

AALTO-YLIOPISTO

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta  
Elektroniikan laitos  
Valaistusyksikkö

Janne Viitanen

Aurinkosähköjärjestelmän yhdistäminen LED-valaistukseen tasajännitteellä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 01.03.2010

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja Tkt Marjukka Puolakka

Tekijä: Janne Viitanen	
Työn nimi: Aurinkosähköjärjestelmän yhdistäminen LED-valaistukseen tasajännitteellä	Sivumäärä: 92
Päivämäärä: 28.02.2010	
Osasto: Elektroniikka ja sähkötekniikka	
Professuuri: Valaistustekniikka	
Työn valvoja: Professori Liisa Halonen	
Työn ohjaaja: Tkt Marjukka Puolakka	
<p>Tiivistelmäteksti:</p> <p>Tässä diplomityössä on pyritty selvittämään aurinkoenergian hyödyntämistä sähköntuotannossa Suomen olosuhteissa.</p> <p>Työn alussa on yleinen kuvaus aurinkosähkön tuotannon perusteista, ledeistä ja pienjännitteisistä tasavirtajärjestelmistä.</p> <p>Pääpaino on työn yhteydessä toteutetun demonstraation tutkimuksessa. Demonstraatiossa yhdistettiin aurinkopaneelijärjestelmä tasajänniteverkon kautta LED-valaistusratkaisuun ja tutkittiin sen toimivuutta.</p> <p>Tämän lisäksi työssä on katsaus Suomessa tähän mennessä toteutettuihin aurinkosähköjärjestelmiin ja niistä saatuihin käyttökokemuksiin. Lisäksi työssä on pyritty selvittämään mitä aurinkosähkö tällä hetkellä maksaa kuluttajan näkökulmasta ja mitä vaihtoehtoja aurinkosähköjärjestelmien toteuttamiseen löytyy.</p>	
Avainsanat: aurinkosähkö, aurinkopaneeli, LED, tasajännite	

Author: Janne Viitanen	
Name of the thesis: Solar panels combined with LED-lighting in low-voltage DC-systems	Number of pages: 92
Date: 28.02.2010	
Department: Electronics and telecommunications	
Professorship: Lighting technics	
Supervisor: Professoship Liisa Halonen	
Instructor: D.Sc. Marjukka Puolakka	
<p>Abstract:</p> <p>In this Master's thesis there is a study about the use of solar energy as an energy source in Finland. In the beginning of this thesis there is a section of background theory about solar energy production basics, LEDs and DC-networks that helps to understand the further chapters.</p> <p>The focus of the work is in a demonstration that was executed. In this this demonstration solar cells were combined directly to LED-lighting through DC-network and inspected the upsides and downsides of this kind of arrangement in arctic conditions.</p> <p>In addition there is a survey about the solar systems that have been built in Finland so far and experiences about these systems. Furthermore, there is a brief report about the price of consumer class solar energy systems today.</p>	
Keywords: DC-network, LED, photovoltaic, solar energy	

## **Alkulause**

Tämä diplomityö on tehty osana Tekesin rahoittamaa SolarLED-projektia, Aalto-yliopiston Teknillisen korkeakoulun valaistusyksikössä.

Haluan kiittää työn valvojana toiminutta professori Liisa Halosta motivoinnista ja aiheen antamisesta työn. Lisäksi haluan kiittää ohjaajana toiminutta TkT Marjukka Puolakkaa ja Jorma Lehtovaaraa neuvojen antamisesta työn toteutuksessa, sekä Martti Paakkista työssä käytettyjen led-valaisinten rakentamisesta. Kiitos myös muulle valaistuslaboratorion henkilökunnalle tuesta.

Kiitokset myös Kiilto Oy:lle aurinkosähköjärjestelmien käyttökokemuksiin vastaamisesta, sekä Naps Systems Oy:lle tässä työssä toteutetun demonstraation aurinkopaneelijärjestelmän toimittamisesta.

Suuri kiitos myös lähisukulaisille, KPS:lle ja muille kavereilleni, jotka olette tarjonneet hyvää vastapainoa työlle. Tiedätte keitä olette.

Erikoiskiitos lopuksi myös Pilvi Waitiselle.

Espoossa helmikuun 28. 2010

Janne Viitanen

# Sisällysluettelo

Alkulause .....	4
Sisällysluettelo .....	5
Symboli ja lyhenneluettelo .....	7
1 Johdanto .....	9
2 Valosta sähköksi ja takaisin .....	10
2.1 Auringon säteily .....	10
2.2 Valokenno .....	12
2.2.1 Valokennon toimintaperiaate .....	13
2.2.2 Sähköntuotanto valokennolla .....	14
2.3 Valokennotyypit .....	20
2.3.1 Yksikidekennot .....	20
2.3.2 Monikidekennot .....	21
2.3.3 Ohutkalvokennot .....	21
2.3.4 Monikerroskennot .....	22
2.3.5 Kvanttipistekennot .....	22
2.3.6 Peilijärjestelmät .....	23
2.4 LED .....	25
2.4.1 Valontuotanto ledeillä .....	25
2.5 LED-tyypit .....	27
2.5.1 LED .....	27
2.5.2 OLED .....	28
2.5.3 Fotodiodi .....	28
2.5.4 Laserdiodi .....	28
3 Pienjännitteinen tasasähköjärjestelmä .....	30
3.1 Tasasähköjärjestelmän toteutus .....	30
3.2 Pienjännitteisen tasasähköjärjestelmän vertailu nykyiseen sähkönjakelujärjestelmään .....	31
4 Suomen aurinkosähkömarkkinat .....	36
4.1 Markkinoilta löytyviä aurinkosähkötuotteita .....	36
4.2 Aurinkosähköjärjestelmien kustannukset tänä päivänä .....	38
5 Kartoitus Suomessa toteutetuista aurinkosähköjärjestelmistä .....	40
5.1 Kartoitus Suomessa toteutetuista aurinkosähköjärjestelmistä .....	40
5.1.1 Kiilto Oy:n tehdas, Lempäälä .....	40
5.1.2 NCC:n pääkonttori, Mannerheimintie, Helsinki .....	41
5.1.3 As. Oy Salvia, Ekoviikki, Helsinki .....	43
5.1.4 Teknillisen korkeakoulun Valotalo, Espoo .....	43
5.1.5 Citymarket Lielähti, Tampere .....	43
5.2 Käyttökokemuksia aurinkosähköjärjestelmistä .....	44
5.3 Aurinkosähkön tulevaisuudennäkymät Suomessa ja maailmalla .....	45
6 Demonstraatio: Aurinkopaneelit ja LED-valaistusjärjestelmä .....	50
Error: Reference source not found .....	50
6.1.1 Asennuspaikka ja asennusjärjestelyt .....	50
6.1.2 Laitteisto .....	52
6.1.3 Demonstraation kustannukset .....	57
6.2 Aurinkopaneelien mittaukset .....	58
6.2.1 Sähkötehon mittaaminen .....	59
6.2.2 Auringon säteilyn mittaaminen .....	60

6.2.3 Asennuskulman vaikutus tuloksiin.....	60
6.2.4 Sähköntuotannon tehokkuus ajan funktiona.....	61
6.2.5 Auringon säteilyintensiteetin mittaustulokset.....	64
6.2.6 Paneeleiden hyötysuhde.....	66
6.3 LED-valaistusratkaisu osana aurinkosähköjärjestelmää.....	69
6.3.1 LED-valaistusratkaisun liittäminen aurinkosähköjärjestelmään.....	69
6.3.2 Valontuotannon tehokkuus ja vertailu perinteiseen valaistusjärjestelmään .....	69
6.3.3 Valontuotannon luotettavuustekijöitä.....	74
6.4 Pohdintaa demonstraation tuloksista.....	75
6.4.1 Kustannukset.....	75
6.4.2 Tehokkuus.....	76
7 Yhteenveto .....	78
Kirjallisuus .....	80
Liitteet .....	84

## Symboli ja lyhenneluettelo

LED	light emitting diode (engl.)
OLED	organic LED (engl.)
PMOLED	Passive matrix OLED (engl.)
AMOLED	active matrix OLED (engl.)
IR	infra red (engl.)
PV	photo voltaic (engl.)
MPTT	maximum power point tracker (engl.)
DC	direct current, tasavirta (engl.)
AC	alternating current, vaihtovirta (engl.)
THD	total harmonic distortion
EUMENA	Europe, the Middle East and North Africa
BIPV	Building Integrated Photo Voltaics
$\alpha_s$	Auringon korkeus, eli maanpinnan ja auringon normaalivektorin välinen kulma
$\gamma$	Tason atsimuuttikulma, eli poikkeama etelän suunnasta itään (-) tai länteen (+) päin.
$\gamma_s$	Auringon atsimuuttikulma, eli auringon aseman poikkeama etelän suunnasta itään (-) tai länteen (+) päin.
$\theta_z$	Zeniittikulma, eli maanpinnan normaalivektorin ja auringon välinen kulma
$\beta$	tason kallistuskulma maanpintaan nähden.
$I_0$	kohtisuoran säteilyn intensiteetti [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$c$	valon nopeus = 299 792 458 m/s
$\lambda$	säteilyn aallonpituus [m]
$f$	säteilyn taajuus [Hz]
$h$	Planckin vakio = $6,626075540 \times 10^{-34}$ Js
$E$	fotonin energia [eV]
$P_{int}$	aktiiviselta alueelta emittoitunut optinen teho [W]
$I$	lediin menevä virta [A]
$e$	elektronin varaus = $-1.602176487(40) \times 10^{-19}$ <a href="#">C</a>
$E_e$	elektronin energia [eV]
$E_h$	aukon energian [eV]
$E_g$	johtavuusvyön energia [eV]
$T$	lämpötila [K]
$K$	Boltzmannin vakio = $8.617\,343(15) \times 10^{-5}$ eV K <sup>-1</sup>
$\Delta\lambda$	aallonpituuskaista [m]
$q$	elektronin alkeisvaraus = $1,6021773 \times 10^{-19}$ C
$P_{ac}$	vaihtosähköjärjestelmän teho
$P_{uni}$	unipolaarijärjestelmän teho
$P_{bi}$	bipolaarijärjestelmän teho
$U_{ac}$	vaihtosähköjärjestelmän jännite
$U_{uni}$	unipolaarijärjestelmän jännite
$U_{bi}$	bipolaarijärjestelmän jännite
$I_{ac,v}$	vaihtosähköjärjestelmän virta
$I_{uni}$	unipolaarijärjestelmän virta
$I_{bi}$	bipolaarijärjestelmän virta

$\varphi$	vaihtosähköjärjestelmän vaihekulma
$P$	aurinkopaneelien teho [W]
$V$	aurinkopaneelien napajännite [V]
$I$	aurinkopaneelien antovirta [I]
$k$	mittauksilla määritetty vakio
$v_{mp}$	mittauspaneelien vastuksen yli oleva jännite [V]
$I$	aurinkopaneelien mitattu antovirta [A]
$E_s$	aurion säteilyntensiteetti [W/m <sup>2</sup> ]
$U_p$	pyranometrin antojännite
$S_p$	pyranometrin herkkyys, tässä tapauksessa vakio = 73,8 μV/W



# 1 Johdanto

Tällä hetkellä ehkäpä tärkeimmät maailmanlaajuiset kysymykset ovat ilmaston muutos ja energian riittävyys tulevaisuuden tarpeisiin. Fossiiliset polttoaineet ovat hupeneva luonnonvara ja lisäksi ne aiheuttavat kasvihuonekaasupäästöjä, joten ne ovat kestämaton ratkaisu molempien kysymysten kannalta pitkällä tähtäimellä.

Tämä on luonut lisääntyvää kiinnostusta uusien puhtaampien energiantuotantomuotojen kehitykseen. Energiaa halutaan siis tuottaa aiempaa ympäristöystävällisemmin ja se halutaan lisäksi hyödyntää tehokkaammin. Teknologisia vaihtoehtoja tämän tarpeen toteuttamiseen on useita ja yhteistä toistaiseksi valmistusasteelle yltäneille tekniikoille on, että yksikään niistä ei sovi jokaiseen tilanteeseen ja ainoaksi energianlähteeksi maailmalaajuisesti. Tässä työssä keskityn aurinkoenergiaan ja siihen, miten sitä voitaisiin hyödyntää etenkin valaistuskäytössä mahdollisimman tehokkaasti.

Nykyisin rakennuksissa on käytössä vaihtojänniteverkko. Suurin osa valaisimista toimii kuitenkin tarvittaessa myös tasajännitteellä. Erityisen hyödyllistä tasajännite on, kun sitä hyödynnetään tulevaisuuden todennäköisesti tärkeimmän valonlähteen eli ledien yhteydessä. Tämä perustuu siihen, että ledit toimivat sisäisesti vain tasajännitteellä ja kun lisäksi tiedetään, että vaihtojännitteen tasasuuntauksessa tapahtuu häviöitä, on luonnollista pohtia voitaisiinko tasajännite tuoda alkuperäisessä muodossaan sähköä tuottavalta laitteelta valaisimille saakka. Kun tähän pohdintaan yhdistetään tasajännitettä tuottava lähde, voidaan kokonaishäviöitä saada vähennettyä. Aurinkopaneelit tuottavat tasajännitettä, joten ne soveltuvat tällaiseen käyttöön hyvin.

Ongelmaksi muodostuu kuitenkin sähkösaannin tasaisuus, sillä aurinkopaneelien sähköntuotanto vaihtelee voimakkaasti sääolosuhteiden, vuodenajan sekä vuorokaudenajan mukaan. Työn viimeisessä osiossa pyrin selvittämään mitä haasteita liittyy aurinkopaneeleilla toteutettavaan sähköntuotantoon ja millaiseen käyttöön aurinkoenergialla tuotettu sähkö on järkevä vaihtoehto. Tätä selvitetään itse toteutetun demonstraation pohjalta, jossa yhdistettiin aurinkosähköjärjestelmä 24 voltin tasajännitteellä suoraan led-valaisimiin. Projektissa mitattiin sekä aurinkoenergian tuotannon, että valaistuksen tehokkuutta ja pyrittiin selvittämään mitä haasteita tämän tyyppisiin järjestelmiin liittyy.

Lisäksi työssä on katsaus Suomen tämänhetkiseen aurinkoenergian tilanteeseen, eli mitä projekteja on toteutettu, miten niissä on onnistuttu ja mitä aurinkoenergia tällä hetkellä maksaa.

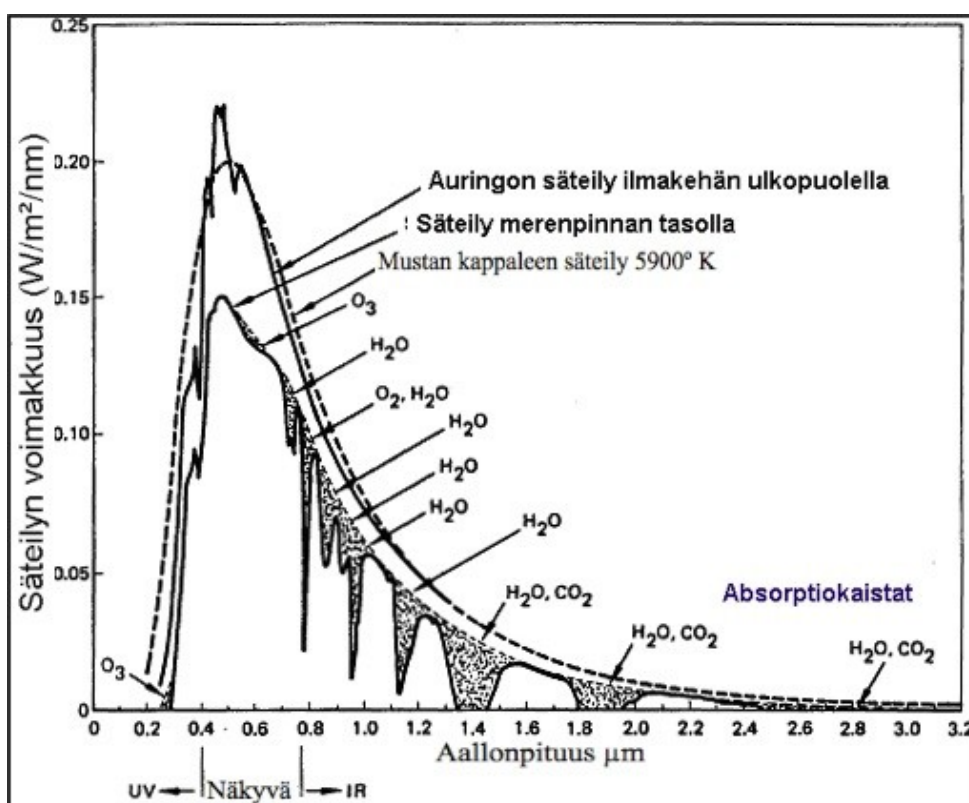
## 2 Valosta sähköksi ja takaisin

Tässä luvussa kuvataan lyhyesti myöhempään tutkimukseen liittyvien ilmiöiden taustoja. Teoriaosuus on hyvin pintapuolinen katsaus ilmiöihin, mutta se antaa pohjan ymmärtää valosähköisiä ilmiöitä ja sen miten ne liittyvät olennaisesti sekä aurinkokennoihin että LED-valaistukseen. Ledejä on käsitelty tarkemmin esim. kirjassa *Light-emitting diodes* (Schubert, 2006) ja aurinkopaneeleita kirjassa *Solar engineering of thermal processes* (Duffie, Beckman, 2006).

### 2.1 Auringon säteily

Suurin osa maapallon energiasta on pohjimmiltaan lähtöisin auringon säteilystä. Säteilyn määrä vaihtelee leveyspiirin, vuodenajan ja vuorokaudenajan mukaan ja lisäksi myös ilmakehän pilvisuus, epäpuhtaudet sekä paikalliset varjostavat kohteet vaikuttavat siihen, miten suuri osa ilmakehään tulevasta säteilystä pääsee maanpinnalle saakka. Tämän lisäksi myös auringon säteilemä energia vaihtelee kausittain  $n. \pm 1,5 \%$ , joka erään teorian mukaan johtuu auringonpilkkujen toiminnasta. Kohtisuoraan aurinkoa kohti olevalle pinnalle joka on juuri ilmakehän ulkopuolella, auringon ja maan välisen keskimääräisen etäisyyden päässä auringosta, kohdistuvaa säteilyä kutsutaan aurinkovakioksi (*solar constant*). Tätä merkitään  $G_{SC}$  ja se on nykyisten mittausten mukaan keskimäärin  $1367 \text{ W/m}^2$ . Tämä siis kuvaa auringosta tulevaa kokonaissäteilyä kohtisuoralle pinnalle. (Duffie, Beckman, 2006)

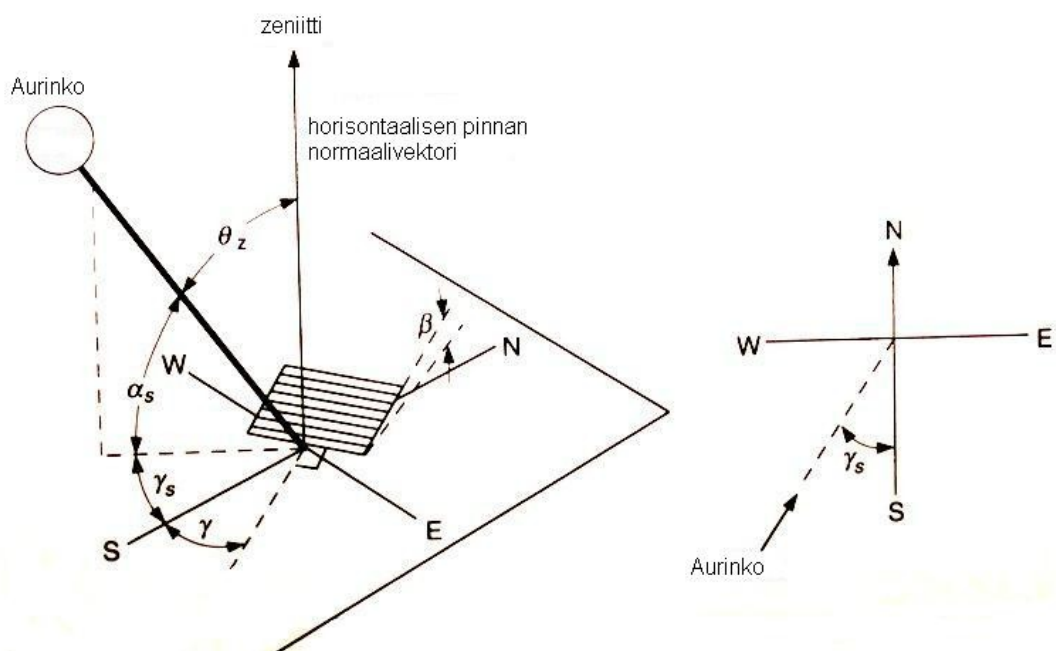
Säteilyn voimakkuuden lisäksi on hyödyllistä tietää myös säteilyn spektri, joka on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Auringon säteilyn voimakkuus ja spektri  
(Kuva piirretty (NASA, 2009) mukaan)

Suurin osa auringon säteilyenergiasta (n. 98 %) säteilee aallonpituuskaistalla 0,25-3,0 mikrometriä. Maanpinnalle tuleva säteily voidaan jakaa suoraan ja diffuusiin säteilyyn. Suora säteily tarkoittaa kohtisuoraan auringosta pinnalle kohdistunutta säteilyä, kun taas diffuusilla säteilyllä tarkoitetaan ilmakehästä ja muista kohteista pinnalle heijastunutta epäsuoraa säteilyä. Aurinkopaneelien yhteydessä olennaisinta on näiden yhdistelmä, eli pinnalle tuleva kokonaissäteily, sillä se määrää miten paljon paneelilla voidaan tuottaa sähköä. (Duffie, Beckman, 2006)

Pinnalle tulevan säteilyn intensiteetti riippuu pinnan normaalivektorin ja auringon normaalivektorin välisistä pysty- ja vaakasuorista kulmista. Kun kulmat ovat mahdollisimman pieniä, eli auringon säteily ja kohtisuoran pinnan normaalivektori ovat yhdensuuntaisia, on säteily kaikkein voimakkainta. Auringon asemaa voidaan kuvata sen zeniitti- ja atsimuuttikulmilla, eli poikkeamalla pystysuorasta vektorista tasoon nähden ja poikkeamalla etelän suunnasta. Atsimuuttikulman poikkeama itään päin etelästä merkitään negatiivisena ja länteen päin positiivisena kulmana. Auringon korkeudella tarkoitetaan zeniittikulman komplementtia, eli auringon säteilyn normaalivektorin ja maanpinnan välistä kulmaa pystysuunnassa. Näitä kulmia on havainnollistettu kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Auringon asema suhteessa vaakasuoraan pintaan  
(Kuva piirretty Duffie, Beckman, 2006 mukaan)

Kuvassa:

$\alpha_s$  = Auringon korkeus, eli maanpinnan ja auringon normaalivektorin välinen kulma

$\gamma$  = Tason atsimuuttikulma, eli poikkeama etelän suunnasta itään (-) tai länteen (+) päin.

$\gamma_s$  = Auringon atsimuuttikulma, eli poikkeama etelän suunnasta itään (-) tai länteen (+) päin.

$\theta_z$  = Zeniittikulma, eli maanpinnan normaalivektorin ja auringon välinen kulma

$\beta$  = Tason kallistuskulma maanpintaan nähden. Aurinkopaneelien kallistuskulmalla tarkoitetaan yleisesti tätä.

Pinnalle tulevan säteilyn tarkka laskeminen edellyttää tietoa sijainnista, vuodenajasta ja

kellonajasta. Näiden tarkempi laskenta on esitetty kirjassa *Solar engineering of thermal processes* (Duffie, Beckman, 2006).

Säteilyintensiteetin laskemiseksi löytyy myös esimerkiksi internetistä laskureita, joista yksi löytyy osoitteesta:

<http://pvcdrom.pveducation.org/SUNLIGHT/MODTILT.HTM>

Yksinkertaistaen etelään suunnatulle tasolle, jonka kallistuskulma on  $\beta$  voidaan säteilyintensiteetti laskea yhtälöllä 2.1:

$$I = I_0 \sin(\alpha_s + \beta) \quad (2.1)$$

jossa:

$I_0$  = kohtisuoran säteilyn intensiteetti [ $\text{W/m}^2$ ]

$\alpha_s$  = auringon korkeus kulmina

$\beta$  = Tason kallistuskulma maanpintaan nähden

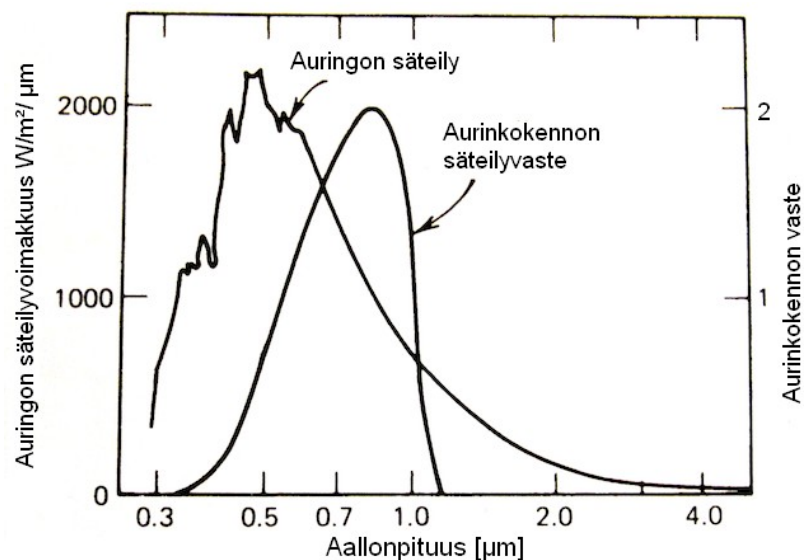
Aurinkopaneelien sähköntuotto on suoraan verrannollinen säteilyintensiteettiin  $I$ .

Seuraavaksi siirrytään siis tutkimaan miten hyvin aurinkopaneeli pystyy hyödyntämään sen pinnalle kohdistuvaa säteilyä sähköntuotannossa.

(Duffie, Beckman 2006)

## 2.2 Valokenno

Valokennot ovat puolijohdekomponentteja jotka muuntavat valosähköisen ilmiön avulla osan auringon säteilyenergiasta suoraan sähköiseksi energiaksi. Valokennoja kutsutaan myös aurinkokennoiksi. Ensimmäiset aurinkokennot kehitettiin 1950-luvulla ja niiden hyötysuhde oli hyvin alhainen ollen n. 5%. Vuosikymmenten aikana alalla on tapahtunut huomattavaa kehitystä ja nykyään laboratorio-olosuhteissa ollaan päästy jo yli 40% hyötysuhteisiin. Aurinkokennon tyypistä riippuu miten suuren osan siihen kohdistuvasta säteilystä se pystyy muuttamaan sähköksi. Yleisimmin käytössä on piihin pohjautuva kenno, jonka säteilyvaste on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3 Aurinkokennon säteilyvaste.  
(Kuva piirretty Duffie, Beckman, 2006 mukaan)

Aurinkokennoja käytetään nykyisin hyvin monenlaisissa laitteissa: satelliiteissa, kelloissa, taskulaskimissa, veneissä, tietoliikennejärjestelmissä sekä viime aikoina lisääntyvässä määrin myös suuremman mittakaavan sähköntuotannossa. (Duffie, Beckman, 2006)

## 2.2.1 Valokennon toimintaperiaate

Aurinkokenno tuottaa sähköä muuntamalla auringon säteilemien fotonien energian elektronien liikkeeksi. Fotonien energian riippuvuus valon taajuudesta ja sitä kautta aallonpituudesta nähdään yhtälöistä 2.2 ja 2.3.

Fotonin energia on siis sitä suurempi, mitä suurempi on sen taajuus ja vastaavasti mitä pienempi on sen aallonpituus.

$$c = \lambda f \quad (2.2)$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

missä:

$c$  = valon nopeus = 299 792 458 m/s

$\lambda$  = säteilyn aallonpituus [m]

$f$  = säteilyn taajuus [Hz]

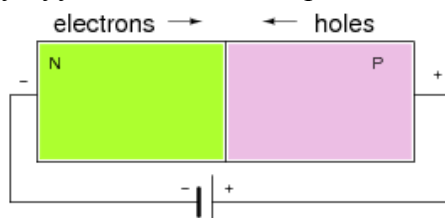
$h$  = Planckin vakio =  $6,626075540 \times 10^{-34}$  Js

$E$  = fotonin energia [eV]

Tyypillisesti aurinkokennot tehdään yksittäisistä pii-kiteistä. Kun auringon säteily osuu pii-atomeista muodostuvaan kidehilaan, fotoni absorboituu siihen. Mikäli fotonin energia on riittävän suuri, se irrottaa elektronin atomin ulkokehältä. Tämä puolestaan johtaa elektroni-aukko-parin muodostumiseen, joka tarkoittaa sitä että atomin uloimmalla kehällä on "aukko" ja irronnut elektroni on vapaana kiderakenteessa.

Normaalisti tällainen epävakaa tilanne katoaa nopeasti, kun elektronit yhdistyvät takaisin aukkojen kanssa. Tätä luontaista yhdistymistä voidaan vähentää luomalla potentiaalivalli, jonka toisella puolella on pii-atomeita, joiden ulkokehällä on elektronivajaus (p-tyyppi) ja toisella puolella pii-atomeita, joiden ulkokehällä on ylimääräisiä elektroneja (n-tyyppi). (Duffie, Beckman, 2006)

Potentiaalivalli saadaan aikaiseksi kun piihin seostetaan hyvin pieniä määriä booria p-tyypin piin muodostamiseksi ja pieniä määriä fosforia n-tyypin muodostamiseksi. Tämä johtaa siihen, että vallin p-puolelle kehittyy elektronivajaus ja n-puolelle elektronien ylijäämä. Jos nämä kerrokset yhdistetään ulkoiseen sähköpiiriin, alkavat elektronit virrata piirin läpi, jolloin syntyy sähkövirtaa. Piin p-n liitos on esitetty kuvassa 2.4



Kuva 2.4 P-N liitos (All About Circuits, 2009)

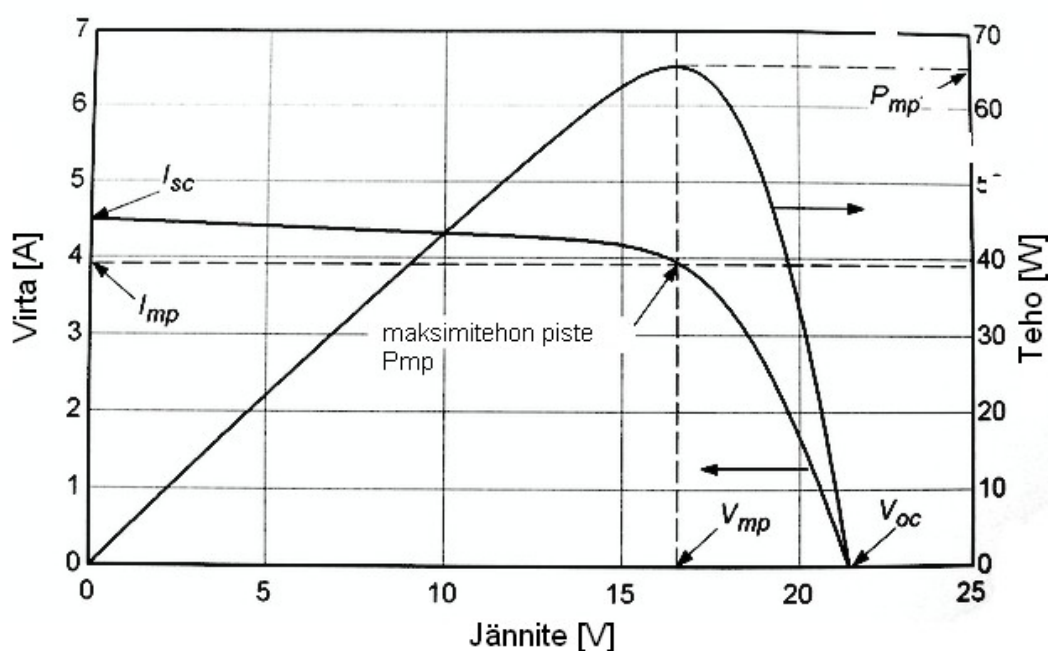
Aurinkokennojen hyötysuhdetta rajoittavat monet tekijät. Elektronin irrottamiseen atomin kehältä vaaditaan tietty kynnysenergia, jota suurempi fotonin energian pitää olla reaktion aikaansaamiseksi. Kynnysenergian suuruus riippuu kennon valmistusaineista.

Koska fotonin energia on kääntäen verrannollinen sen aallonpituuteen, voidaan johtaa eri materiaaleille aallonpituuden maksimi-arvot, joita suuremmilla fotonin aallonpituuden arvoilla sen energia on liian pieni irrotustyön aikaansaamiseksi, eikä sähkövirtaa tällöin synny. Piille tämä aallonpituus on 1,15 mikrometriä. Mikäli energia on tätä pienempi, eli aallonpituus on suurempi kuin irrotustyön maksimi-aallonpituus, fotonin energia muuttuu kiteessä lämmöksi. Koska jokainen foton voi irrottaa maksimissaan vain yhden elektronin ja irrotustyön vaatima energia on materiaalikohtaisesti vakio, fotonin sisältämä ylimääräinen energia muuttuu myöskin lämmöksi. (Duffie, Beckman, 2006)

Jo nämä tekijät rajoittavat pii-pohjaisen aurinkokennon hyötysuhteen maksimissaan tasolle 23%. Kun näihin lisätään vielä kiteen pinnassa tapahtuvat heijastushäviöt ja se, että kiteen yläpuolen pinta-alasta osa kuluu sähköjohdotuksen tarpeisiin, mikä pienentää kennon efektiivistä pinta-alaa, hyötysuhde jää tätä alemmaksi. Parhaiden kaupallisissa tuotannossa olevien pii-pohjaisten aurinkopaneelien hyötysuhde on tällä hetkellä hieman alle 20%. (Duffie, Beckman, 2006)

## 2.2.2 Sähköntuotanto valokennolla

Sähköntuotannon tehokkuus aurinkopaneelilla riippuu paneelissa käytetyistä materiaaleista ja toteutustavasta, auringon säteilyn intensiteetistä, paneelin lämpötilasta, sekä siitä miten paneelin tuotanto pystytään sovittamaan sitä kuluttavaan kuormaan. Kuvassa 2.5 on esitetty tyypillisen valokennomoduulin oikosulkuvirta- ja avoimen piirin jännite-käyrät. Suurin mahdollinen teho saavutetaan pisteessä  $P_{mp}$ , joka on merkitty kuvaan. Tässä pisteessä siis käyrien alle jäävä pinta-ala on mahdollisimman suuri. Ideaalisessa tapauksessa aurinkopaneelit toimisivat aina pisteessä  $P_{mp}$ , mutta käytännössä niiden toimintapiste määräytyy niihin kytkettyjen kuormien perusteella.



Kuva 2.5 Oikosuljetun ja avoimen piirin käyrät sekä huipputehon pisteet (Kuva piirretty Duffie, Beckman, 2006 mukaan)

Kuvassa:

$I_{sc}$  = aurinkopaneelin oikosulkuvirta [A]

$I_{mp}$  = virran suuruus maksimitehon pisteessä  $P_{mp}$  [A]

$V_{oc}$  = avoimen piirin jännite [V]

$V_{mp}$  = jännitteen suuruus maksimitehon pisteessä  $P_{mp}$  [V]

$P_{mp}$  = maksimitehon piste [W]

Paneelin oikosulkuvirta kasvaa suoraan verrannollisesti paneelille tulevan säteilyn intensiteetin kasvaessa, kun taas sen avoimen piirin jännite nousee logaritmisesti. Tämä vuorovaikutus on piirretty kuvaan 2.6, kuten myös huipputehon piste kullakin säteilytasolla. Paneelin teho saadaan yhtälöstä 2.4:

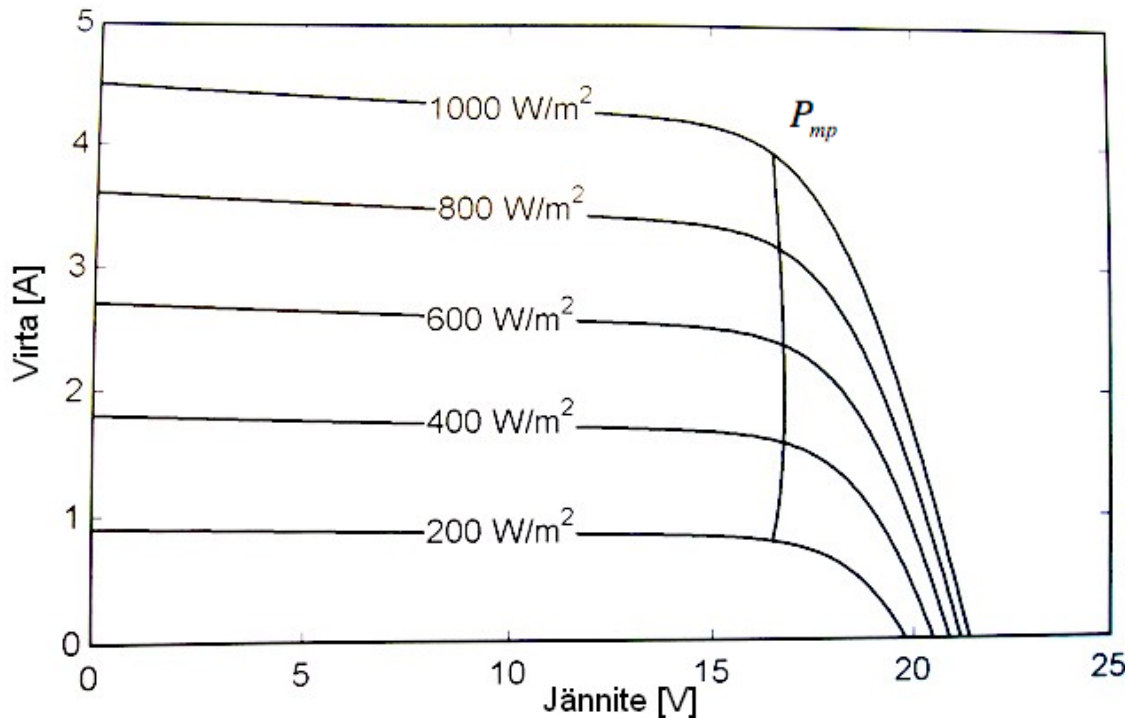
$$P = UI \quad (2.4)$$

Kutakin kuvan 2.6 säteilytasoa vastaava maksimiteho  $P_{mp}$  on laskettu taulukkoon 2.1.

Taulukko 2.1

$W / m^2$	200	400	600	800	1000
U [V]	16.4	16.8	16.7	16.55	16.5
I [A]	0.75	1.6	2.35	3.2	3.9
$P_{mp}$ [W]	12.3	26.88	39.245	52.96	64.35

Tästä nähdään, että paneelilta saatava maksimiteho on lähes lineaarinen suhteessa säteilyintensiteetin kasvuun.



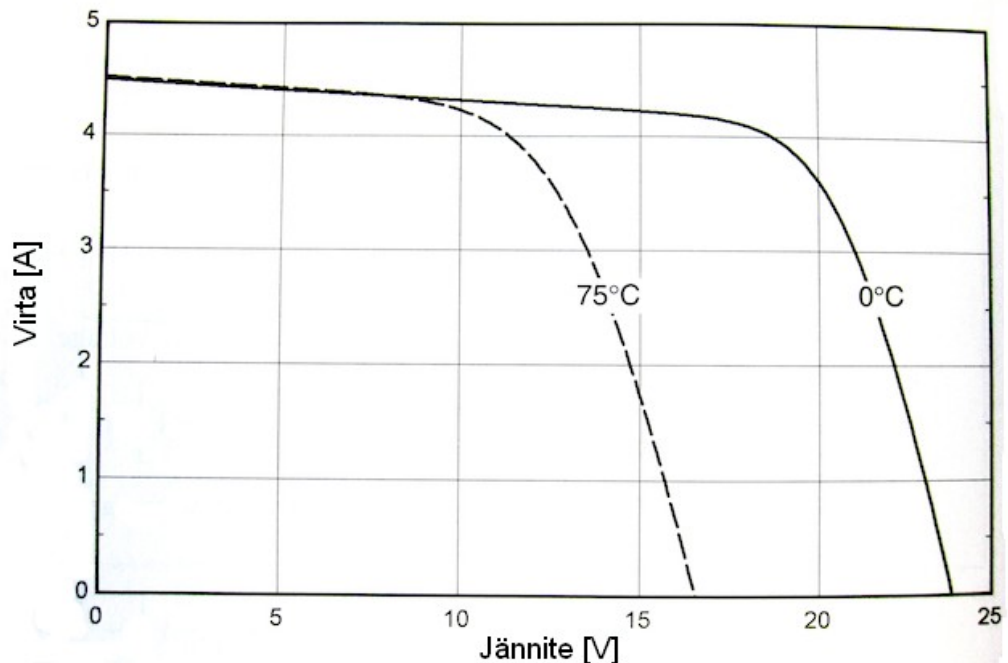
Kuva 2.6 Säteilyintensiteetin vaikutus U-I käyriin  
(Kuva piirretty Duffie, Beckman, 2006 mukaan)

Säteilyn voimakkuuden lisäksi myös paneelin lämpötila vaikuttaa olennaisesti sen hyötysuhteeseen ja sitä kautta ulos saatavaan tehoon. Oikosulkuvirta kasvaa lievästi kun



paneelin lämpötila nousee, mutta toisaalta avoimen piirin jännite tippuu huomattavasti. Tästä johtuen käytännössä paneelista saadaan suurin teho silloin kun sen käyttölämpötila on alhainen.

Paneelin jännitteen ja virran käyttäytymistä kahdessa eri lämpötilassa on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7 U-I käyrät eri lämpötiloissa  
(Kuva piirretty Duffie, Beckman, 2006 mukaan)

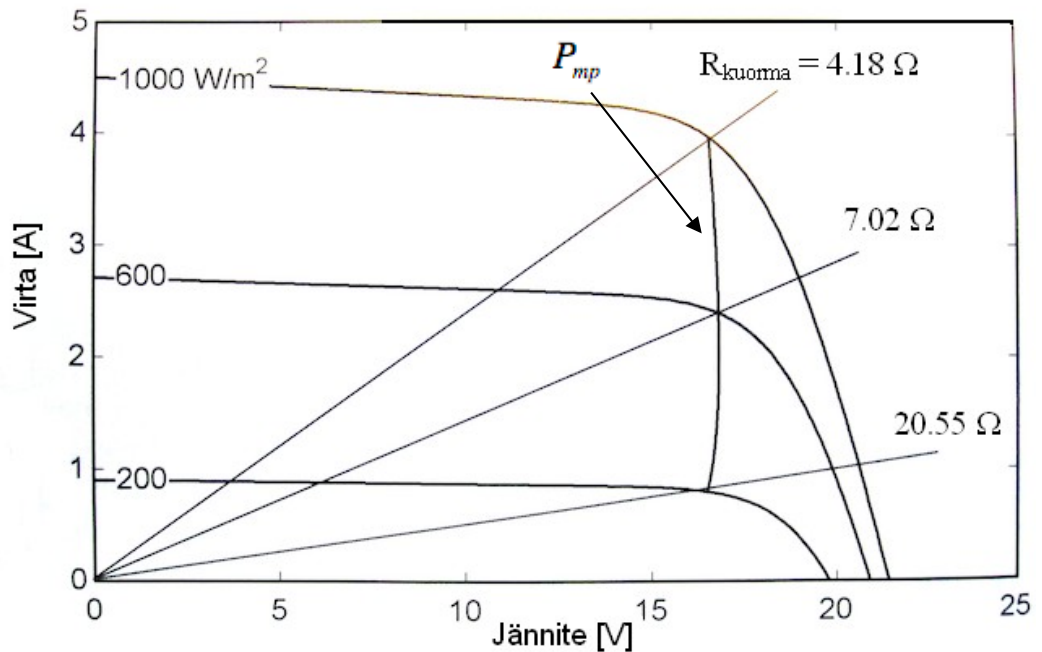
Lämpenemistä voidaan estää asentamalla paneelien taustapuolelle joko passiivisia jäähdyttimiä, joissa lämpö säteilee suoraan ilmaan, tai aktiivisia jäähdyttimiä, eli yleensä nestejäähdytys. Aktiivinen jäähdytys toisaalta vie sähköä, mutta mikäli ympäristön lämpötila on korkea, sen vaikutus aurinkopaneelistosta ulospäin saatavan sähkön määrään jää usein silti positiiviseksi. Mikäli järjestelmä rakennetaan siten että aurinkoenergiaa hyödynnetään sähköntuotannon lisäksi myös käyttöveden lämmittämässä, voidaan saavuttaa parannusta kokonaishyötysuhteessa. Tällöin siis aurinkopaneelien lämpö siirtyy veteen, josta se otetaan talteen ja viilennyt vesi kierrätetään uudelleen paneeleille.

Merkittävä osuus siitä miten tehokkaasti aurinkopaneeleja voidaan hyödyntää sähköntuotannossa riippuu paneelistoon liitetystä kuormasta, sillä paneeli pyrkii säätämään jännitettä ja virtaa siten että se vastaa kuormaa. Täten kullakin säteilyintensiteettitasolla saavutetaan maksimaalinen tuotto, kun kuorma on oikein sovitettu vastaamaan käytettävää paneelia, jolloin paneeli toimii optimaalisessa toimintapisteessä.

Resistiivisellä kuormalla aurinkopaneeli ei yleensä toimi kovin tehokkaasti, sillä kuorma on usein staattinen, jolloin paneeli ei toimi optimaalisesti. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.8.

Kukin suora viiva kuvaa staattista resistanssia ja kuvasta nähdään että maksimitehot, eli kutakin säteilyintensiteettitasoa vastaava suurin pinta-ala UI saavutetaan erilaisilla kuormilla.





Kuva 2.8 Aurinkopaneelin tuotto resistiivisellä kuormalla kolmella eri säteilytasolla.  
(Kuva piirretty Duffie, Beckman, 2006 mukaan)

Esimerkin vuoksi taulukossa 2.1 on laskettu tehot kullakin staattisella resistanssilla, eri säteilytasolla. Kutakin säteilytasoa ja resistanssia vastaava teho  $P$  on laskettu yhtälön 2.4 mukaan.

Kunkin säteilytason maksimiteho on lihavoitu taulukossa, jotta nähtäisiin helpoimmin millä resistanssilla se on saavutettu

Taulukko 2.2 Aurinkopaneelin tuotot eri resistansseilla ja säteilytehoilla

**R = 4.18**

W / m <sup>2</sup>	200	600	1000
U [V]	3.5	10.9	16.5
I [A]	0.9	2.6	3.9
P [W]	3.15	28.34	<b>64.35</b>

**R = 7.02**

W / m <sup>2</sup>	200	600	1000
U [V]	6	16.7	19
I [A]	0.8	2.35	2.7
P [W]	4.8	<b>39.25</b>	51.3

**R = 20.55**

W / m <sup>2</sup>	200	600	1000
U [V]	16.4	19.9	20.6
I [A]	0.75	0.9	1
P [W]	<b>12.3</b>	17.91	20.6

Maksimitehon saavuttamiseksi on kehitetty elektronisia *maximum power point tracker*

(MPTT) laitteita tilanteisiin, joissa kuorman ja tuotannon välinen ero on suuri. MPTT muuttaa kuormaa dynaamisesti säteilytason mukaan, siten että kuorma pysyy aina optimaalisena, jolloin päästään parempaan hyötysuhteeseen. Luonnollisesti MPTT kuluttaa myös jonkun verran sähköä toimintaansa.

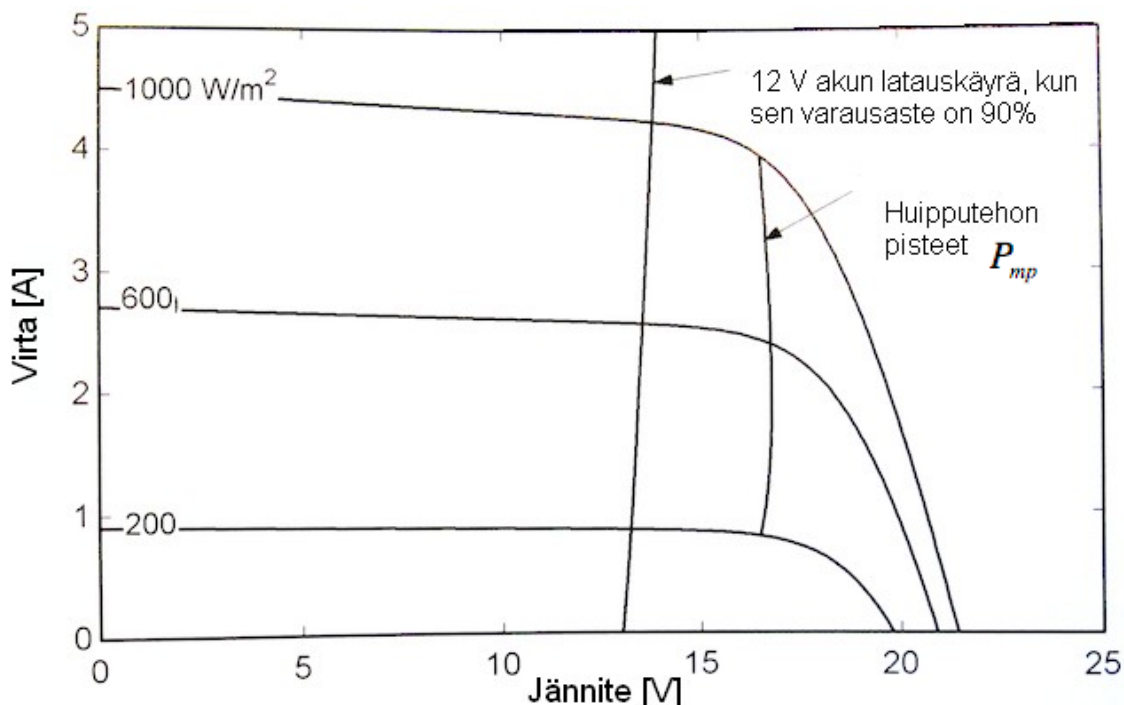
Lyijyakun sisäinen resistanssi sen sijaan vaihtelee sen varaustason mukaan. Tämän vuoksi se soveltuu staattista resistanssia paremmin aurinkopaneelin kuormaksi. Erityisen hyvin lyijyakku seuraa huipputehon pisteitä, kun akun varaustaso on korkea, sillä tällöin sen jännite nousee nopeasti sitä varaavan virran mukana. Kun verrataan kuvia 2.8 ja 2.9, sekä taulukoita 2.2 ja 2.3 keskenään, huomataan että akuston sisäinen resistanssi on huomattavasti lähempänä huipputehon pisteitä useimmissa tapauksissa kuin staattisella kuormalla.

Taulukko 2.3 Lyijyakkuun kytketyn aurinkopaneelin teho eri varausasteilla

**Lyijyakku, jonka täyttöaste = 90%**

$W / m^2$	200	600	1000
U [V]	12.9	13.4	13.7
I [A]	0.9	2.6	4.2
P [W]	11.61	34.84	57.54

Kuvassa 2.9 paneelien lämpötila on  $+25^\circ\text{C}$ . Kun muistetaan että paneelin avoimen piirin jännite tippuu lämpötilan kasvaessa, huipputehon pisteet siirtyvät vielä lähemmäksi akuston resistanssikäyrää, sitä mukaa kun paneelit lämpenevät. Käytännössä tämä siis tarkoittaa sitä, että aurinkopaneelit pystyvät siirtämään melko tehokkaasti tuottamaansa energiaa lyijyakkuihin, etenkin kun akkujen varaustaso on korkea.



Kuva 2.9 Paneelin UI-käyrät kolmella eri säteilyteholla ja akun varaustason kasvu kun akun varaustaso on 90%.  
(Kuva piirretty Duffie, Beckman, 2006 mukaan)

Aurinkopaneelit voidaan kytkeä suoraan myös esimerkiksi tasavirtamoottoreihin. Moottorityypistä riippuu miten tehokkaasti tuotanto ja kulutus kohtaavat, mutta yleensä melko heikosti. Tämän vuoksi moottorikäyttöissä väliin tarvitaan yleensä järjestelmä joka tasaa tehontuotantoa. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi kytkemällä akusto kuorman ja paneeliston kanssa rinnan. (Duffie, Beckman, 2006)

## 2.3 Valokennotyypit

Valokennotekniikka keksittiin alunperin avaruustekniikan tarpeisiin 1950-luvulla ja se oli pitkään liian kallista tavanomaiseen sähköntuotantoon kaupallisesti tai yksityisesti. Viime vuosikymmeninä siinä on kuitenkin tapahtunut kiihtyvällä tahdilla uusia innovaatioita, joilla on pyritty saamaan sähköntuotannon hyötysuhdetta paremmaksi ja kennojen hintaa halvemmaksi. Tällä hetkellä menossa oleva maailmanlaajuinen pyrkimys tuottaa enemmän energiaa ja ennen kaikkea perinteisiä sähköntuotantomuotoja ympäristöystävällisemmin, on hyödyttänyt osaltaan aurinkokennojen kehitystä.

Valokennot ovat kuitenkin vielä nykyäänkin suhteellisen kalliita, joten niiden sähköntuotantoa on pyritty tehostamaan eri keinoilla. Tässä kappaleessa kerrotaan pääpiirteittäin nykyisin käytössä olevista aurinkokennotyypeistä, niiden eroista ja tavoista joilla sähköntuotannon tehokkuutta on saatu parannettua. Yksityiskohtaisempi selvitys eri paneelitekniikoilla saavutetuista tämänhetkisistä hyötysuhteista löytyy liitteestä 1.

Aurinkoenergialla voidaan tuottaa sähköä myös hyödyntämällä auringon säteilyn lämmittävää vaikutusta. Tämän tyyppinen sähköntuotanto voidaan myös yhdistää valokennojen sähköntuotantoon hyödyntämällä aurinkopaneelien jäähdytysvettä esim. Stirling-moottoreissa, jotka toimivat sähkögeneraattoreina. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan paneeliduta tarkemmin aurinkolämmön sovelluksiin vaan keskitytään nimenomaan valosähköisen ilmiön hyödyntämistekniikoihin.

### 2.3.1 Yksikidekennot

Yksikidekennot valmistetaan yksittäisistä piikiteistä. Yksittäisten piikiteiden valmistus on kallista, sillä ne leikataan yhtenäisestä pyöreästä piisauvasta. Osa materiaalista menee tällä tekniikalla aina hukkaan, sillä pyöreiden palojen asettelu neliömäisen paneelin pinnalle tarkoittaa paljon hukkatilaa palojen väliin (jolloin saman tehoisesta paneelistä pitäisi tehdä isompi) ja toisaalta neliön mallisten palojen leikkaaminen sylinterimäisestä kiekosta hukkaa raakamateriaalia suhteellisen paljon. Kompromissina näiden väliltä yksikide-paneelin kennot ovat neliön mallisia, joiden kulmista on leikattu palat pois. Tällä pyritään siis saamaan mahdollisimman suuri osa materiaalista ja samalla paneelin pinta-alasta hyödynnettyä. Tyypillisiä yksikidekennoja on esitetty alla olevassa kuvassa. (top-alternative-energy-sources.com, 2008)



Kuva 2.10 Yksikiteisiä piikennoja (top-alternative-energy-sources.com, 2008)

### 2.3.2 Monikidekennot

Monikiteisten piikennojen ero yksikiteisiin on, että ne koostuvat nimensä mukaisesti useammasta kiteestä. Monikiteiset kennot valmistetaan valamalla piimassasta aurinkopaneelin muotoinen yhtenäinen piikerros. Valmistuskustannukset jäävät yksikidekennoja pienemmäksi, sillä materiaalia ei mene hukkaan läheskään niin paljon. Haittapuolena yksikiteisiin nähden on että hyötysuhde jää ainakin teoreettisesti pienemmäksi kuin yksikiteisillä piikennoilla. Uusimmilla monikidetekniikoilla on kuitenkin päästy lähelle yksikiteisten piipaneelien hyötysuhteita, eli n. 20%.



Kuva 2.11 Monikiteinen aurinkokenno (Hebe Corporation, 2008)

### 2.3.3 Ohutkalvokennot

Ohutkalvokennojen valmistus vaatii huomattavasti vähemmän valoherkkää materiaalia kuin perinteiset kiderakenteiset piikennot. Tämä pienentää kustannuksia ja mahdollistaa huomattavasti kevytrakenteisempien aurinkopaneelien rakennuksen. Heikkoutena kiderakenteisiin kennoihin nähden on huonompi hyötysuhde, joka jää yleensä tasolle 7-10%. Tätä voidaan kuitenkin parantaa käyttämällä monikerrostekniikkaa, jossa useasta eri materiaalista valmistettuja kalvoja on aseteltu päällekkäin. Ohutkalvokennoista voidaan valmistaa todella ohuita ja taipuisia, jolloin niitä voidaan käyttää esimerkiksi rakenteiden pinnoittamiseen.



Kuva 2.12 Ohutkalvokenno (top-alternative-energy-sources.com, 2008)

### 2.3.4 Monikerroskennot

Monikerroskennot eroavat yksikerroksista kenoista siinä, että niissä on asetettu useammasta eri materiaalista tehtyjä kerroksia päällekkäin. Tällöin eri materiaaleista valmistetut kerrokset absorboivat eri taajuisia fotoneita. Tällöin pystytään hyödyntämään suurempi osa auringon säteilyenergiasta ja päästään korkeampaan sähköntuotannon hyötysuhteeseen. Monimutkaisemmasta rakenteesta johtuen monikerroskennot ovat yksikerroskennoja kalliimpia.

Tammikuussa 2009 Fraunhofer instituutin tutkijat kertoivat lehdistötiedotteessaan päässeensä 41,1% hyötysuhteeseen GaInP/GaInAs/Ge-monikerroskennolla. (Fraunhofer ISE, 2009). Myös muutamat muut tutkimusryhmät ovat raportoineet päässeensä suunnilleen samaan tulokseen ja tuoreimman hyötysuhde-ennätyksen haltija onkin vaihdellut tiheään tahtiin viime vuosina. Laboratorio-olosuhteissa saavutetuista hyötysuhteista on kuitenkin vielä toistaiseksi matkaa kaupallisten tuotteiden hyötysuhteisiin, jotka jäävät huomattavasti alhaisimmiksi.

### 2.3.5 Kvanttipistekennot

Kvanttipisteet, joita kutsutaan myös nanopartikkeleiksi, ovat puoli-johtavia kiteitä joiden koko on nanometriluokkaa. Näillä partikkeleilla on kvantittuneita optisia ominaisuuksia, joita ei esiinny suuremmilla kappaleilla, johtuen siitä että elektroniaukko-pareja ei pääse muodostumaan parin nanometrin kokoisella alueella spontaanisti. Perinteisten aurinkokennojen hyötysuhdetta rajoittaa materiaali-kohtainen johto- ja valenssivyön välillä olevan energian suuruus, joka määrää elektronin irrotukseen tarvittavan kynnysenergian, eli minkä aallonpituiset fotonit pystyvät irrottamaan elektronin kennon materiaalin atomien ulkokehältä (luku 2.1). Eli mitä suurempi on johtavuus- ja valenssivyöiden välinen etäisyys, sitä pidempiä aallonpituuksia materiaali absorboi.

Kvanttipisteiden etu perinteisiin materiaaleihin verrattuna on että kynnysenergian suuruus on säädettävissä, eli minkä aallonpituisia fotoneja materiaali kykenee absorboimaan. Tällöin kvanttipisteen koko määrää mitä aallonpituuksia se absorboi. Kun eri kokoisia kvanttipisteitä yhdistetään, auringonvalosta voidaan hyödyntää laajempaa aallonpituuskaistaa sähköntuotannossa.

Perinteisiin kide-rakenteisiin puolijohdemateriaaleihin verrattuna kvanttipistemateriaalin etu on myös se, että siitä voidaan valaa monia eri muotoja, esimerkiksi liuskoja tai kolmiulotteisia matriisirakenteita. Niitä voidaan myös yhdistää orgaanisten polymeerien kanssa ja monien muiden materiaalien, kuten muovin, lasin tai metallin jolloin saadaan halpoja rakenteita.

Mikäli kvanttipisteistä muodostetaan kolmiulotteisia rakenteita, yhdellä suurienergisellä fotonilla on mahdollista irrottaa useampi elektroni materiaalista, jolloin saadaan enemmän sähköä. Tämä pohjautuu siihen, että suurienergisien fotonien ylimääräinen energia joka perinteisesti on muuttunut lämmöksi, pysyy rakenteessa ”vangittuna” pidempään ja hyppää viereisen kvanttipisterakenteen hyödynnettäväksi. Laboratorio-olosuhteissa yhdellä fotonilla on saatu irrotettua kolme elektronia normaalin yhden sijaan lyijy-selenidistä valmistetuilla kvanttipisteillä. Kvanttipistekennot ovat vielä kehitysasteella, mutta teoriassa niillä voitaisiin päästä yli 65% hyötysuhteisiin.

(ISIS, 2006)

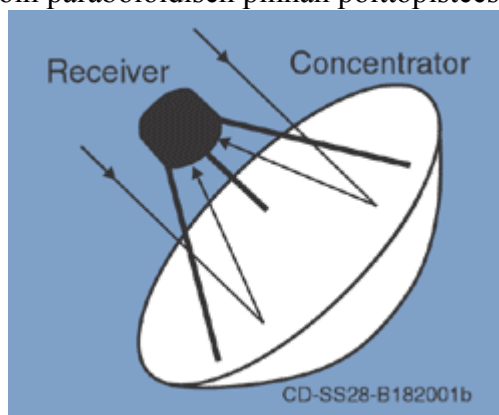
### 2.3.6 Peilijärjestelmät

Valoherkät puolijohteet ovat suhteellisen kalliita. Koska tuotetun sähkön määrä on riippuvainen aurinkopaneelin hyötysuhteen lisäksi myös siitä, miten paljon siihen kohdistuu säteilyä, on luontevaa pyrkiä lisäämään tämän säteilyn määrää. Tämä voidaan toteuttaa kohdistamalla erilaisten peilijärjestelmien avulla valoa aurinkokennolle. Tällöin peilin pinta-ala on usein moninkertainen verrattuna valoherkän alueen pinta-alaan.

Peilityyppejä on useita: tasopeilit, paraboloidiset peilit ja Fresnel-peilit. (NREL, 2009)

Tasopeilit ovat kaikkein yksinkertaisin vaihtoehto, mutta ne ovat kaikkein herkimpiä valon tulokulman muutokselle. Tasopeilejä käytetään esimerkiksi järjestelmässä jossa niitä on aseteltu sopivin välimatkoin keskellä olevan valoa keräävän tornin ympärille. Peilejä käännetään tällöin mekaanisesti sen mukaan kun auringon asema taivaalla muuttuu.

Paraboloidiset peilit voivat olla joko kouru- tai lautas-tyyppisiä. Idea on sama kuin aurinkotorneissa, eli ympärillä olevilla peileillä keskitetään valoa keskellä olevaan valoherkkään materiaaliin. Lautastyypiset järjestelmät muistuttavat ulkonäöltään satelliitti-antenneja, jolloin paraboloidisen pinnan polttopisteessä on aurinkokenno.



Kuva 2.13 Lautasmallisen peilin periaatekuva (EIS, 2009)

Kourut ovat periaatteeltaan muuten samanlaisia, mutta peilit ovat muodoltaan pitkulaisia ja valoa keräävä pinta on viivamainen.



Kuva 2.14 Kourumallisia aurinkopeilejä (EIS, 2009)

Fresnel-peilit ovat lievästi kaarevia tai täysin tasomaisia peilejä, joilla pyritään jäljittelemään paraboloidista kouru-peiliä. Peilit ovat siis keskenään eri kallistuskulmassa, siten että ne kaikki heijastavat tulevan valon samalle alueelle. Tämän etuna on paraboloidisia peilejä halvempi hinta. Toisin kuin aurinkotorneissa, Fresnel-ratkaisussa riittää auringon aseman seuraaminen yhtä akselia pitkin, johtuen viivamaisesta valoa keräävästä paneelistä.



Kuva 2.15 Fresnel-peilijärjestelmä (EIS, 2009)

Valon keskittäminen pienelle alueelle nostaa aurinkokeräimen lämpötilaa. Tämän vuoksi peilijärjestelmän puolijohteilta vaaditaan suurta lämmönkestoa ja toisaalta järjestelmät vaativat jäähdytyksen. (EIS, 2009)



## 2.4 LED

Lyhenne LED tulee sanoista *light-emitting diode*, eli valoa emittoiva diodi. Tämä kertoo hyvin mihin ledien toiminta perustuu. Diodit ovat puolijohdekomponentteja jotka johtavat sähköä vain toiseen suuntaan kun tietty kynnysjännite ylittyy. Ledit eroavat normaaleista diodeista siinä että ne muuttavat niiden läpi kulkevan sähkövirran valoksi, sen sijaan että päästäisivät sen kulkemaan lähes häviöttömästi eteenpäin piirissä. (Sihvonen, 2009)

### 2.4.1 Valontuotanto ledeillä

Ideaalinen led emittoi jokaista siihen syötettyä elektronia kohden yhden fotonin. Emittoituminen tapahtuu ns. aktiivisella alueella. Tätä emittoimistehokkuutta kuvataan sisäisellä kvanttitehokkuudella (*internal quantum efficiency*), joka reaali maailman ledeissä jää ideaalista pienemmäksi ja sitä kuvataan yhtälöllä 2.5:

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}/(h\nu)}{I/e} \quad (2.5)$$

jossa:

$P_{int}$  = aktiiviselta alueelta emittoitunut optinen teho [W]

$I$  = lediin menevä virta [A]

$e$  = elektronin varaus =  $-1.602176487(40) \times 10^{-19}$  C

$h$  = Planckin vakio =  $6,626075540 \times 10^{-34}$  Js

$\nu$  = säteilyn taajuus [Hz]

$\eta_{int}$  = sisäinen kvanttitehokkuus

Yhtälön yläkerta kuvaa aktiiviselta alueelta emittoituneiden fotonien lukumäärää sekunnissa ja alakerta lediin syötettyjen elektronien määrää sekunnissa.

Todellisissa ledeissä kaikki aktiiviselta alueelta emittoituneet fotonit eivät kuitenkaan pääse pakenemaan ledin kuvasta ulos erilaisten häviömekanismien takia. Tätä tehokkuutta kuvataan termillä *extraction efficiency* joka saadaan yhtälöstä 2.6:

$$\eta_{extraction} = \frac{P/(h\nu)}{P_{int}/(h\nu)} \quad (2.6)$$

Yhtälön yläkerta kertoo tässä tapauksessa ympäristöön emittoituneiden fotonien lukumäärän sekunnissa ja alakerta puolestaan aktiiviselta alueelta emittoituneiden fotonien lukumäärän sekunnissa.

Etenkin suuritehoisissa ledeissä tämä suhde rajoittaa usein kokonaishyötysuhdetta, sillä sitä on hankala nostaa yli 50% ilman monimutkaisia ja kalliita toimenpiteitä.

Kun yhtälöt 2.5 ja 2.6 yhdistetään, saadaan kokonaishyötysuhdetta kuvaava yhtälö 2.7 ns. *external quantum efficiency*:

$$\eta_{ext} = \frac{P/h\nu}{P_{int}/h\nu} \quad (2.7)$$

Yhtälö 2.7 kertoo siis miten monta fonia saadaan ledistä ulos suhteessa siihen syötettyjen elektronien määrään. Hyötysuhdetta kuvaa myös ns. *power efficiency* joka kertoo paljonko ledistä saadaan optista tehoa ulos suhteessa siihen syötettyyn sähkötehoon yhtälön 2.8 mukaisesti:

$$h_{power} = \frac{P}{IV} \quad (2.8)$$

jossa:

$V$  = jännite [V]

Fyysinen mekanismi jolla ledit emittoivat valoa on käytännössä käänteinen versio aurinkopaneelien yhteydessä esitetystä valosähköisestä ilmiöstä joka tuotti sähköä. Eli ledien sisällä elektroni-aukko parit yhdistyvät ja niiden energioiden erotus emittoituu fotoniksi yhtälön 2.9 mukaan.

$$h\nu = E_e - E_h \gg E_g \quad (2.9)$$

jossa:

$E_e$  = elektronin energia [eV]

$E_h$  = aukon energian [eV]

$E_g$  = johtavuusvyön energia [eV]

Tämä erotus on suunnilleen samansuuruinen kuin puolijohteen materiaalista riippuva johtavuusvyön ja valenssivyön välinen energygeettinen etäisyys  $E_g$ . Koska fotonin taajuus ja aallonpituus riippuvat sen energiasta, myös emittoituneen valon väri riippuu tästä. Täten emittoituneen fotonin energia ja valon väri ovat riippuvaisia puolijohteesta. Ilmiö on tarkemmin selostettu kirjassa *Light Emitting Diodes*, Schubert (2006), s. 87-89.

Toisin kuin normaalit diodit, jotka on valmistettu usein germaniumista tai piistä ja säteilevät sähköä johtaessaan lähinnä lämpöä, ledien säteily on tyypillisesti näkyvän valon aallonpituuksilla. Tämän valon aallonpituus ja sitä vastaava silmän näkemä väri riippuu ledien valmistusaineista.

Liitteessä 1. on esitetty tyypillisesti käytettyjen ledien säteilemät aallonpituudet, niitä vastaavat värit sekä niiden aiheuttamat jännitteenalenemat. Ledien säteilemän valon intensiteetti vaihtelee välillä 1-1000 mcd. (Sihvonen, 2009)

Ledit säteilevät siis valoa vain kapealla aallonpituuskaistalla. Tämän kaistan leveys saadaan yhtälöstä 2.10

$$D\lambda = \frac{1.8 kT \lambda^2}{hc} \quad (2.10)$$

jossa:

$T$  = lämpötila [K]

$K$  = Boltzmannin vakio =  $8.617\,343(15) \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$

$\Delta\lambda$  = aallonpituuskaista [m]

$h$  = Planckin vakio =  $6,626075540 \times 10^{-34} \text{ Js}$

$c$  = valon nopeus =  $299\,792\,458 \text{ m/s}$

Ledien päästösuuntainen jännite on korkeampi kuin muilla diodeilla, ollen yleensä n. 1,8 - 2,2 V ja tietyillä led-tyypeillä jopa 3,5 - 4,2 V.

Tätä jännitettä voidaan arvioida fotonin energian yhtälöllä 2.11:

$$qU = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.11)$$

jossa:

$\lambda$  = valon aallonpituus [m]

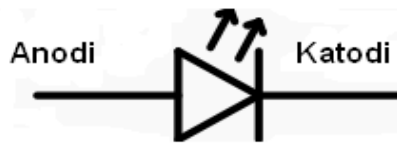
$q$  = elektronin alkeisvaraus =  $1,6021773 \times 10^{-19}$  C

$c$  = valon nopeus = 299 792 458 m/s

$f$  = taajuus [Hz]

$h$  = Planckin vakio =  $6,626075540 \times 10^{-34}$  Js

Yhtälö 2.11 ei ole täysin tarkka, mutta antaa hyvän käsityksen ledin jännitteen ja säteilemän valon aallonpituuden välisestä suhteesta (kts. liite 2). Eli mitä suurempi on valon aallonpituus, sitä pienempi on ledin ylitse kulkeva päästösuuntainen jännite. Ensimmäisenä kehitetyt punaiset ledit vaativat siis pienimmän jännitteen, kun taas viime vuosina kehitetyt siniset ledit ja niihin pohjautuvat valkoiset ledit vaativat suurimman jännitteen. Estosuunnassa ledit kestävät yleensä vain 5-10 V jännitteen rikkoutumatta. Ledin piirrosmerkki on esitetty kuvassa 2.16.



Kuva 2.16 Ledin sähkötekkinen piirrosmerkki

Maksimivirta minkä ledit kestävät on yleensä n. 10-30 mA. Toimiakseen led vaatii etuvastuksen, joka sovittaa ledin yli olevan jännitteen ja sen läpi kulkevan virran sopivalle tasolle.

Toisin kuin perinteisissä lampuissa, esim. hehkulampussa, ledien säteilemä aallonpituuskaista on hyvin kapea. Tämän vuoksi ledien tuottaman valon väriä ei voida muuttaa suodattamalla, vaan erilaisia värisävyjä saadaan käyttämällä erivärisiä ledejä tai yhdistelemällä näitä.

(Sihvonen, 2009)

## 2.5 LED-tyypit

Tässä kappaleessa on hyvin lyhyesti esitelty ledien päätyypit. Näiden yksityiskohtaisempi käsittely löytyy esimerkiksi kirjasta *Light-emitting diodes* (Schubert, 2006).

### 2.5.1 LED



Kuva 2.17 Luxeon 3W suurteholedi

LED on yleisnimi valoa emittoiville diodeille. Tyypillisesti tällä tarkoitetaan näkyvän valon aallonpituuksia emittoivia diodeita, joiden valon väri riippuu

valmistusmateriaalista. Yksittäisen ledin säteilemä valon aallonpituuskaista on kapea. Valon väri riippuu ledin valmistuksessa käytetystä puolijohdemateriaalista. Valon väriä voidaan muokata pinnoittamalla ledin pinta esimerkiksi loisteaineilla. Näin saadaan tuotettua esimerkiksi valkoista valoa päällystämällä sininen ledi fluorisoivalla loisteaineella. Eri värejä voidaan tuottaa yhdistämällä useita eri värisiä ledejä ja muuttamalla niiden keskinäisiä kirkkaussuhteita. Eräs ledien alatyyppejä on UV-ledi, joka säteilee valoa ultraviolettialueella. Tämän silmällä näkymättömän valon sovelluksia ovat esimerkiksi bakteerien tuhoaminen, sillä ne eivät kestä suuri-intensiteettistä UV-valoa.

### **2.5.2 OLED**

Oledit ovat orgaanisia materiaaleja jotka emittoivat valoa kun sähkövirta kulkee niiden läpi. Oledit eivät tarvitse suodattimia eri värisävyjen tuottamiseen ja niistä voidaan valmistaa hyvin ohuita. Tämän takia niistä onkin povattu tulevaisuuden tekniikkaa korvaamaan nykyiset LCD-näytöt.

Oled-tekniikat jaetaan AMOLED ja PMOLED ryhmiin. Näiden ero on siinä että passiivi-matriisi-tekniikassa (PMOLED) OLED-paneelia ohjataan kokonaisuutena. Tällöin yksittäiset pisteet valaistetaan kytkemällä tietty rivi ja tietty sarake päälle, jolloin näiden risteyskohdassa oleva piste alkaa valaisemaan. Aktiivimatriisi-tekniikassa (AMOLED) jokaista pikseliä ohjataan erikseen. Passiivi-matriisi tekniikka on halvempaa ja yksinkertaisempaa valmistaa, mutta se vaatii enemmän sähköä toimiakseen ja sen avulla ei voida valmistaa suuria pintoja teknisten rajoitusten vuoksi. (OLED info, 2009)

Oledit mahdollistavat uudentyyppisten valaisevien pintojen rakentamisen, sillä ne ovat perinteisiin valaisimiin ja myös muihin ledeihin verrattuna ohuempia ja niistä voidaan rakentaa suuria kalvomaisia pintoja. Haittapuolena niissä on himmeämpi kirkkaus verrattuna muihin ledeihin ja perinteisesti myös elinikä on jäänyt huomattavasti lyhyemmäksi. Näihin tosin odotetaan parannuksia teknologian kehittyessä. Toistaiseksi oledit ovat kehitysasteella ja niitä on hyödynnetty lähinnä pienikokoisten kannettavien laitteiden näytöissä. (OLED info, 2009)

Oledeihin perustuvia valaisimia ei ole toistaiseksi tehty muuta kuin prototyyppimielessä. Osittain tämä johtuu teknologian nykyisestä kalleudesta ja valaisinkäyttöön heikosta valotehokkuudesta. (OLED info, 2009)

### **2.5.3 Fotodiodi**

Fotodiodi eroaa tavallisesta ledistä siinä, että se toimii vastakkaiseen suuntaan. Sen estosuuntainen jännite riippuu diodille tulevan ulkopuolisen valon voimakkuudesta. Diodi alkaa siis johtaa, kun sille tulee ulkopuolelta riittävän voimakas valo. Tämän vuoksi niitä käytetään erilaisissa ilmaisimissa, joissa infrapunaLEDillä lähetetty signaali välitetään fotodiodin kautta laitteelle. Tällaisia ilmaisimia käytetään esimerkiksi kaukosäätimissä. (Sihvonen, 2009)

### **2.5.4 Laserdiodi**

Laserdiodi ei eroa pienillä virroilla tavallisista ledeistä. Virran kasvaessa suuremmaksi sen säteilemä valo muuttuu koherentiksi, eli laserdiodin emittoimat valonsäteet lähtevät diodilta samanvaiheisinä. Tästä johtuen sen kirkkaus on suurempi kuin tavanomaisilla diodeilla, mutta valo sisältää vain yhtä aallonpituutta. Laserdiodin käyttökohteita ovat mm. optiset asemat, tietoliikenne sekä erilaiset mittalaitteet.(Sihvonen, 2009)

### 3 Pienjännitteinen tasasähköjärjestelmä

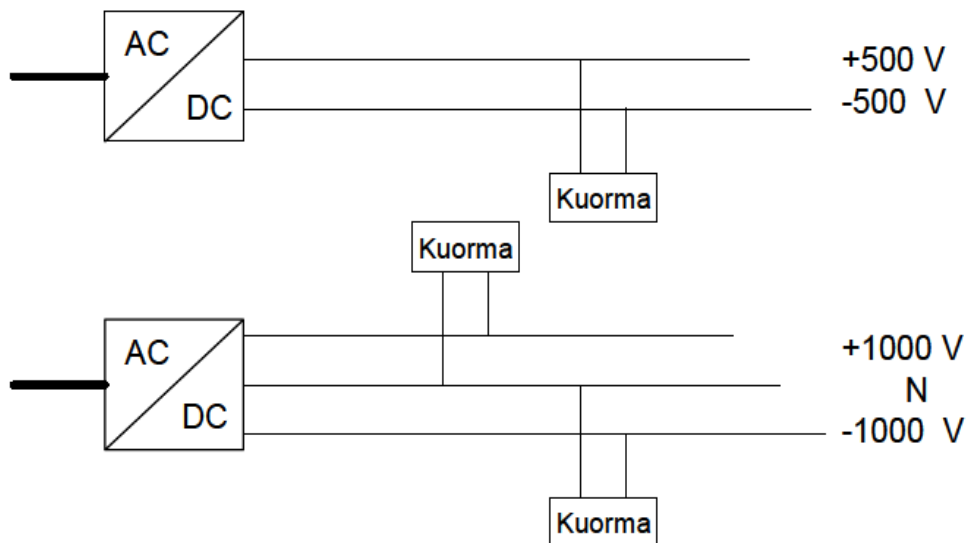
EU-alueen sisällä pienjännite määritellään alle 1000 voltiksi vaihtojännitettä ja alle 1500 voltiksi tasajännitettä. (Kylkisalo, Alanen, 2006) Tasajännitejakelussa on monia yhteneväisiä piirteitä yleisemmin käytössä olevan vaihtojännitejakelun kanssa, mutta se tarjoaa myös muutamia etuja vaihtojännitteeseen verrattuna.

Molempia voidaan siirtää käyttäen samaa kaapelointia, jos järjestelmä suunnitellaan sopivasti. Tässä kappaleessa selvitetään mitä eroja vaihto- ja tasajännitejakelussa on ja mitä etuja tasajännitejakelusta olisi aurinkosähköjärjestelmien kannalta.

#### 3.1 Tasasähköjärjestelmän toteutus

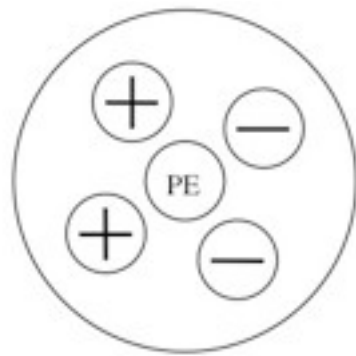
Tasajännite- eli DC-järjestelmä perustuu yleensä kahteen rinnakkaiseen johtimeen, joista toisessa on positiivinen jännite ja toisessa negatiivinen. Tällaista järjestelmää kutsutaan unipolaariseksi. Korkeampien jännitteiden tapauksessa voidaan käyttää myös lisäksi nollajohtoa. Tällöin nollajohtimen ja navan välinen jännite on puolet napojen välisestä jännitteestä. Kolmijohtimista järjestelmää kutsutaan bipolaarikseksi järjestelmäksi. Kuvassa 3.1 on esitetty esimerkki unipolaarisesta ja bipolaarisesta järjestelmästä.

Unipolaarisessa järjestelmässä kuorma kytketään suoraan napojen välille, bipolaarisessa taas navan ja maan välille. Mikäli kuorman vaatima jännite on eri kuin tasasähköjärjestelmän jännite, vaaditaan väliin DC/DC- tai DC/AC-muunnin kuorman tyypistä riippuen.

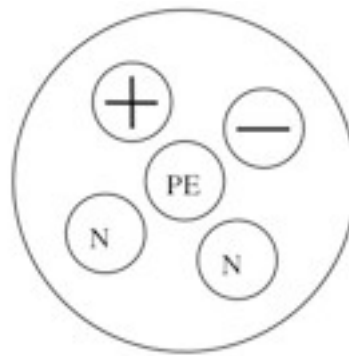


Kuva 3.1 Unipolaarinen ja bipolaarinen tasasähköjakelu.  
(Kylkisalo, Alanen, 2007)

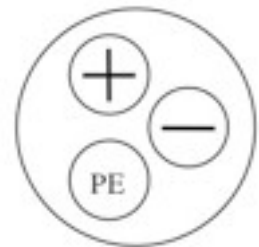
Tasasähköjärjestelmässä voidaan hyödyntää olemassa olevia vaihtosähköverkon kaapeleita. Kuvassa 3.2 on esitetty eri vaihtoehtoja tämän toteutukseen, riippuen siitä moniko johtimista kaapelia käytetään. Osa johtimista voidaan myös jättää kytkemättä, mikäli niitä ei tarvita. Kuvassa vaihtoehdot a) ja c) ovat käytössä unipolaarisella järjestelmällä ja vaihtoehto b) bipolaarisella järjestelmällä.



a) 5-johtiminen kaapeli



b) 5-johtiminen kaapeli



c) 3-johtiminen kaapeli

Kuva 3.2 Tasasähköjärjestelmän johdinvaihtoehdot

Kuvassa:

+ ja - = napajohtimia

N = nollajohdin

PE = suojamaan johdin

Toistaiseksi kiinteistöjen tasajänniteverkoille ei ole määritelty standardia, joten käytettävä jännite voi olla periaatteessa mitä vain EU:n määrittelemältä tasajännitealueelta, eli väliltä 0-1500 V. On myös esitetty että kiinteistöissä voisi olla useampi tasajännitetaso käytössä eri laitteiden tarpeita ajatellen. Näitä voisivat olla esimerkiksi 12, 24, 48, 120, tai 230 voltia, joka on nykyisen vaihtojännitteen jakelujännite. Useamman jännitetason yhtäaikaista käyttöä edellyttää tällöin erillistä kaapelointia kutakin jännitetasoa varten.

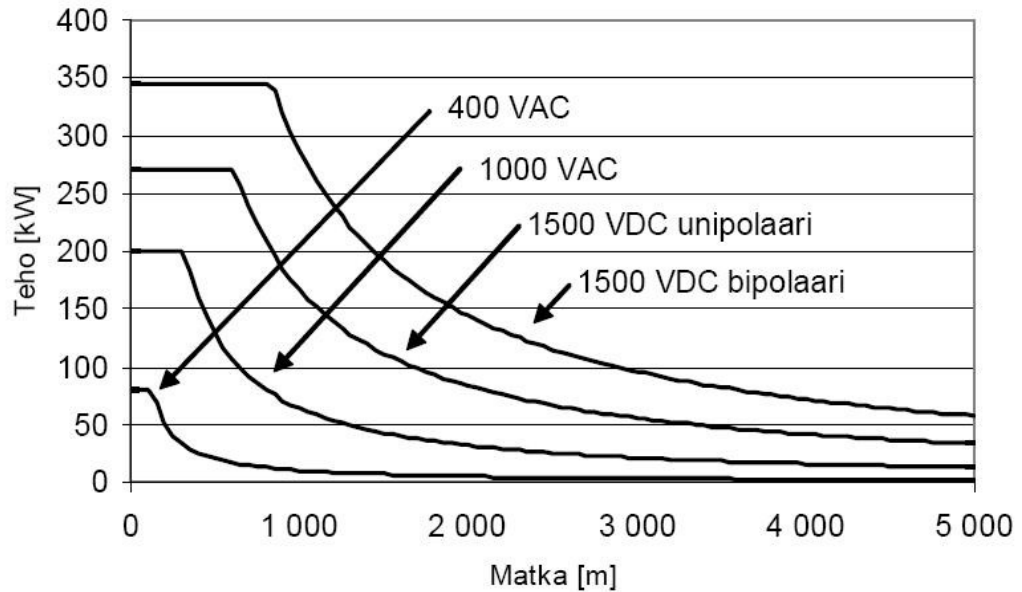
Korkeampi jännite mahdollistaa pienempien virtojen siirron kuin pienempi, mikäli siirretty teho pysyy samana, mutta toisaalta korkea jännite edellyttää parempaa eristystä kaapeleilta turvallisuussyistä. Yksi vaihtoehto voisi olla, että kiinteistöön syötettäisiin sähköä suuremmalla jännitteellä, joka muunnettaisiin tämän jälkeen pienemmälle tasolle. (Kylkisalo, Alanen, 2007)

### 3.2 Pienjännitteisen tasasähköjärjestelmän vertailu nykyiseen sähköjakelujärjestelmään

Vaihtojänniteverkko on altis induktiivisille ja resistiivisille häviöille, jotka ilmenevät jännitteenalenemana ja sähköön laadun heikkenemisenä. Näiden määrä riippuu kaapeloinnista, sähköön taajuudesta, kaapelin pituudesta ja ulkoisten häiriölähteiden määrästä. Tasajännitteellä johdon induktanssi ei vaikuta silloin kun järjestelmä on jatkuvuustilassa. Tasajännitteellä johtimessa ei esiinny myöskään virranahtoa, jolloin häviöresistanssi on pienempi. (Mörsky, 1994; Paavola, 1975)

Tasajänniteverkko sietää siis paremmin ulkoisia häiriöitä ja häviöt jäävät vaihtojänniteverkkoja pienemmiksi, etenkin kun siirtoetäisyydet kasvavat suuriksi. Tällöin siis vastaavaa kaapelia pitkin saadaan siirrettyä suurempia tehoja tasajännitteellä kuin vaihtojännitteellä. Tätä on havainnollistettu alla olevassa kuvassa 3.3.

Koska paksummat kaapelit nostavat järjestelmän hintaa, AC-järjestelmän kaapelointikustannukset nousevat suuremmaksi jos halutaan siirtää sama määrä tehoa.



Kuva 3.3 Vaihto- ja tasajännitteen siirtoetäisyys tehon funktiona samassa johtimessa 6% jännitteenalenemalla (Kylkisalo, Alanen, 2007)

Tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien välinen tehonsiirtokyky rajoittuu lyhyillä siirtomatkoilla termisen siirtokyvyn rajalle. Tällöin tehonsiirtokyky riippuu käytettävistä jännitteistä, vaihtosähköjärjestelmän vaihekulmasta, sekä siirtojohtojen termisistä kuormitettavuuksista. Järjestelmien tehonsiirtokykyä voidaan vertailla yhtälön 3.1 avulla unipolaarisen ja vaihtosähköjärjestelmän välillä ja vastaavasti bipolaarisen ja vaihtosähköjärjestelmän välillä yhtälöstä 3.2.

$$\frac{P_{uni}}{P_{ac}} = \frac{U_{uni} I_{uni}}{\sqrt{3} U_{ac} I_{ac,v} \cos j} \quad (3.1)$$

$$\frac{P_{bi}}{P_{ac}} = \frac{U_{bi} I_{bi}}{\sqrt{3} U_{ac} I_{ac,v} \cos j} \quad (3.2)$$

jossa:

- $P_{ac}$  = vaihtojärjestelmän teho
- $P_{uni}$  = unipolaarijärjestelmän teho
- $P_{bi}$  = bipolaarijärjestelmän teho
- $U_{ac}$  = vaihtosähköjärjestelmän jännite
- $U_{uni}$  = unipolaarijärjestelmän jännite
- $U_{bi}$  = bipolaarijärjestelmän jännite
- $I_{ac,v}$  = vaihtosähköjärjestelmän virta
- $I_{uni}$  = unipolaarijärjestelmän virta
- $I_{bi}$  = bipolaarijärjestelmän virta
- $\varphi$  = vaihtosähköjärjestelmän vaihekulma

Siirtotehon vertailun ja häviöiden laskennan tarkemmat yhtälöt löytyvät esimerkiksi Pasi Salosen diplomityöstä *Tasasähkön hyödyntämismahdollisuudet sähkönjakelussa* (LUT, 2006).



Sähköjohdossa siirtyy kokonaistehoa. Vaihtosähköjärjestelmässä tämä koostuu pätötehosta ja loistehosta, joista vain pätötehoa voidaan yleensä hyödyntää ja loistehon siirto aiheuttaa tarpeettomia lisäkustannuksia verkkoyhtiöille. Loisteho siis kasvattaa verkossa kulkevan virran määrää ja kuormittaa näin ollen verkkoa. Tämän vuoksi verkkoon kytketyille laitoksille jotka kuluttavat paljon loistehoa on Suomessa asetettu loistehomaksu. Moottorit, muuntajat, loistelamppujen magneettiset kuristimet ja muut induktiiviset kuormat kuluttavat loistehoa, mutta tämän loistehon tuotanto on kannattavampaa tehdä lähellä kulutuspistettä esimerkiksi kondensaattoreilla, kuin siirtää sitä jakeluverkossa pitkiä matkoja.

Tasasähköjärjestelmässä kaikki siirtynyt teho on pätötehoa. Tällöin vältetään loistehon siirrosta aiheutuneista lisäkuormituksista ja kaikki siirretty teho voidaan hyödyntää kulutuskohdeissa. (Kylkisalo, Alanen, 2007)

Vaihtojännitteeseen saattaa syntyä häiriökomponentteja, jotka lisäävät signaalin säröä (THD, *total harmonic distortion*), kun taas DC-järjestelmän jännitemuoto on tasainen. DC-järjestelmä voi siis osaltaan parantaa myös sähköön laatua. (Kylkisalo, Alanen, 2007) Tasasähköjärjestelmä ei myöskään siirrä oikosulkuvirtoja rakenteensa takia, joten sen käytöstä on etua verkon vikatilanteissa. Bipolaarista tasasähköjärjestelmää on mahdollista käyttää vikatapauksessa myös puolella teholla, sillä siinä tasasähkölinkin navat toimivat itsenäisesti, riippumatta toisen toiminnasta (kts. kuva 3.1).

Jos tasasähköyhteyden suojaus toteutetaan 1 kV vaihtosähköjärjestelmän tavoin johdonsuojakatkaisijalla, muodostaa jokainen tasasähköyhteys tällöin oman itsenäisen suojausalueensa. Tämä parantaa jakelujärjestelmän käyttövarmuutta, joka näkyy asiakkaiden kokemien keskeytysten pituuden sekä lukumäärän vähenemisenä. Keskeytysten väheneminen taas pienentää verkkoyhtiön huoltokustannuksia. (Mörsky, 1994; Paavola, 1975)

Tasasähköjärjestelmillä on mahdollista rakentaa myös autonomisesti toimivia mikroverkkoja, jotka sisältävät hajautettua energiantuotantoa. Tämä voi osaltaan parantaa sähköön laatua, pienentää siirtoverkon kuormitusta lyhentyneiden siirtomatkojen muodossa ja vikatilanteessa pienentää aluetta jolle sähkökatko leviää. (Kylkisalo, Alanen, 2007)

Kiinteistön tasajännitejakelua puoltaa myös se että suurin osa nykyisin käytössä olevista sähkölaitteista toimii sisäisesti tasajännitteellä, tai ne ovat helposti muunnettavissa toimimaan sillä. Lisäksi tasajännitejakelua puoltaa se tässäkin työssä esille tuleva seikka, että siihen on vaihtojännitejärjestelmää helpompi kytkeä hajautettua energiantuotantoa.

Esimerkiksi liedet, sähköpatterit, suurin osa valaisimista, tietokoneet, A/V-laitteet, DC-moottorit, aurinkokennot, polttokennot, akut ja sähköautot voitaisiin kytkeä suoraan tasajänniteverkkoon, mikäli jännitetaso on laitteille sopiva. Vaihtosuuntaajan avulla myös AC-moottorit ja muut vain vaihtovirralla toimivat laitteet voitaisiin myös kytkeä tasajänniteverkkoon.

Toistaiseksi laitteet on suunniteltu toimimaan vaihtosähköverkossa. Koska iso osa laitteista toimii kuitenkin sisäisesti tasajännitteellä, tasasähköjärjestelmään siirryttäessä olisi nykyään käytetty vaihtojännitteen muuntaminen tasajännitteeksi tarpeetonta ja näin ollen kokonaishyötysuhde paranisi, kun tasasuuntauksessa tapahtuvat muuntohäviöt jäisivät pois.

Eri jännitetasoilla toimivat tasajännitelaitteet vaatisivat luonnollisesti DC/DC muuntimia, mutta näiden hyötysuhde on tyypillisesti korkea verrattuna pienitehoisiin

AC/DC muuntajiin.

Aurinkokennojen ja esimerkiksi polttokennojen kytkeminen tasajänniteverkkoon on yksinkertaista, sillä ne tuottavat itsessään tasajännitettä. Tämä voidaan syöttää suoraan sähköverkkoon, mikäli verkon jännite ja tuotantolaitoksen jännite vastaavat toisiaan. Mikäli jännitetasot ovat eri suuruiset, ne voidaan sovittaa toisiinsa DC/DC katkojan avulla. Nykyisin hyvien tasasähkökatkojen hyötysuhde on noin 90%. (Kylkisalo, Alanen, 2007)

Vaihtojänniteverkkoon kytketyissä aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien inverttereiden, eli vaihtosuuntajien, keskimääräinen hyötysuhde on n. 90%, mutta hyvissä olosuhteissa hyötysuhde voi nousta lähelle 95% mallista ja olosuhteista riippuen (SMA, 2008).

Mikäli kuorman ja verkon väliin pitää asettaa jännitteen muunnin, ei tasajännitteisyydestä saavuteta hyötyä tässä kohtaa. Hajautetun energiantuotannon yhteydessä onkin olennaista pyrkiä mitoittamaan tuotanto kulutukseen mahdollisimman hyvin, jolloin turhilta muunnoksilta välttyään.

Hajautettu energiantuotanto on tyypillisesti altista sääolosuhteiden vaihtelulle, joten sähköön saannin jatkuvuutta on syytä turvata esimerkiksi akustoilla. Akut toimivat tasajännitteellä, joten ne on helppo kytkeä DC-verkkoon varavoimanlähteeksi.

Vaikka DC-teknologia tarjoaakin parannusta sähkön laatuun ja mahdollisesti myös tehohyötyjä, on siinä myös omat ongelmansa. Ehkäpä tärkeimmät näistä ovat oikosulkuvirran mittausta ja katkaisu. Toisin kuin vaihtovirrassa, tasavirrassa ei ole virran nollakohtia, jolloin se voitaisiin helposti katkaista. Vaihtovirralla suunnitellut katkaisijat pystyvät katkaisemaan ainoastaan osan nimellisvirrastaan tasavirralla. Tasavirtakatkaisijan avausvälin tulee olla riittävä, jotta ilmassa kulkeva elektronivirta eli valokaari saadaan sammumaan. Lisätietoja tasajänniteverkon yhteydessä tarvittavista verkkokomponenteista löytyy esim. Toni Kylkisaloon ja Raili Alasen julkaisusta *Tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikroverkoissa*. Tasajänniteverkon maadoituskäytäntöihin perehdytään puolestaan tarkemmin Per Karlssonin ja Jörgen Svenssonin artikkelissa *Fault Detection and Clearance in DC Distributed Power Systems*.

Mikäli tasasähköjärjestelmässä käytetään alhaista jännitettä, esim. 12-48V, myös kuormavirrat saattavat nousta kaapeleissa suuriksi mikäli verkon laitteiden tehontarve on suuri. Tämä puolestaan edellyttää, että kaapelit mitoitetetaan riittävän paksuiksi, tai muuten ne saattavat kuumeta. (Kylkisalo, Alanen, 2007)

Tasajänniteverkkojen yleistymisen kannalta on olennaista, miten kannattavaksi uusiutuvien energianlähteiden kuten aurinkoenergian rakentaminen muodostuu, sillä näiden kytkeminen tasajänniteverkkoon on vaihtojänniteverkkoa yksinkertaisempaa. Aurinkoenergian yleistyminen taas on riippuvaista siitä aletaanko aurinkosähkön tuottajille maksaa syöttötariffeja. Syöttötariffilla tarkoitetaan hajautetun energian tuottajille maksettavaa korvausta siitä osasta sähköä minkä nämä syöttävät yleiseen sähköverkkoon. Mikäli tariffeja ei makseta, pienjännitteisten tasasähköjärjestelmien laajamittainen rakentaminen ei ole todennäköistä.

Mikäli syöttötariffijärjestelmä toteutuu, periaatteessa kuka tahansa voisi olla sekä sähkön kuluttaja että tuottaja, sillä tasasähköjärjestelmä mahdollistaa vaihtojänniteverkkoa helpomman tehon syöttämisen verkkoon, on yleinen verkko sitten

toteutettu tasajännitteisenä tai nykyisen mukaisena vaihtojänniteverkkona. Tämä johtuu siitä, että tasajännitteellä ei eri verkkoja tarvitse tahdistaa samaan vaiheeseen ja taajuuteen yhdistämistä varten, toisin kuin kahta eri vaihtojännitejärjestelmää yhdistettäessä. (Kylkisalo, Alanen, 2007)

Kiinteistöjen tasajänniteverkkojen lisäksi tasajännitteisyydestä voitaisiin saavuttaa etuja myös sähkön siirrossa keski- ja suurjänniteverkoissa, sekä sähkön laadun parantamisessa jakeluverkkojen yhteydessä. Tässä työssä en kuitenkaan paneudu näihin tämän tarkemmin. Lisätietoja näistä löytyy esim. julkaisusta *Tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikroverkoissa* (Kylkisalo, Alanen, 2007)

## 4 Suomen aurinkosähkömarkkinat

Toistaiseksi suurin osa Suomeen asennetuista aurinkosähköjärjestelmistä on ollut pieniä, lähinnä mökkeihin asennettuja järjestelmiä. Viimeisen vuosikymmenen aikana on alkanut esiintyä kiinnostusta myös suurempien tuotantolaitosten rakentamiseen, uusiutuvan energian kiinnostavuuden lisääntymisen myötä. Tässä luvussa käydään läpi Suomen markkinoilta löytyviä kuluttajille suunnattuja aurinkosähkötuotteita ja pyritään selvittämään mitä ne maksavat tällä hetkellä. Tässä on keskitytty nimenomaan kuluttajille suunnattuihin tuotteisiin joita saa kaupasta, sillä suurempien projektien hintavertailu on hankalaa projektien erilaisten luonteiden ja toteutustapojen vuoksi, jotka vaikuttavat myös niiden hintoihin.

### 4.1 Markkinoilta löytyviä aurinkosähkötuotteita

Tällä hetkellä eniten Suomen markkinoille aurinkosähköjärjestelmiä toimittava yhtiö on suomalainen Naps Systems Oy. Naps on toimittanut aurinkosähköjärjestelmät kaikkiin suurimpiin aurinkosähköprojekteihin, jotka on toistaiseksi toteutettu maassamme. Tämän lisäksi Napsin valikoimista löytyy myös kuluttajille suunnattuja ratkaisuja. Aikaisemmin yhtiö kehitti itse markkinoimiansa aurinkopaneeleita ja muita järjestelmäkomponentteja, mutta sittemmin se on siirtynyt palveluntarjoajaksi, joka myy muiden valmistamia tuotteita, sekä lisäksi järjestelmien suunnittelu- ja asennuspalveluita.

Napsin lisäksi Suomen markkinoilta löytyy kuluttajille suunnattuna mm. ruotsalaisen Gällivere Photo Voltaicin (GPV), italialaisen FVG Energyn, saksalaisten Solaran ja SunSetin, yhdysvaltalaisen SunPowerin ja japanilaisen Kyoceran aurinkopaneeleita.

Suurin osa kuluttajille markkinoitavista paneeleista on toteutettu joko yksikide- tai monikidepää-tekniikalla. Näiden lisäksi tulossa on lisääntyvässä määrin myös ohutkalvotekniikalla toimivia paneeleita, mutta niiden hyötysuhde on toistaiseksi huonompi kuin piipohjaisten kennojen, joka osaltaan karsii mielenkiintoa niitä kohtaan. Huonompi hyötysuhde tarkoittaa, että saman sähkömäärän saamiseksi paneelien vaatima pinta-ala on suurempi, mikä hankaloittaa jälkiasennuksia rakenteiden pinnalle. Ohutkalvotekniikka on kuitenkin mahdollista integroida suoraan rakennusmateriaalien pintaan, jolloin suuri pinta-ala-vaatimus ei ole niin suuri ongelma. Tulevaisuudessa kalvomateriaalien kehittyessä ohutkalvotekniikalta odotetaan paljon, mutta Toistaiseksi tekniikka on kuitenkin vielä turhan kallista ja hyötysuhde turhan heikko, että nämä yleistyisivät kovin suuressa mittakaavassa. Kuvassa 4.1 on esimerkkejä eri paneelityypeistä.



Kuva 4.1 a) Yksikidepaneeli



b) Ohutkalvopaneeli



c) Monikidepaneeli

Valokennoja on erillisten aurinkopaneelien lisäksi integroitu myös muiden tuotteiden yhteyteen, kuten esimerkiksi taskulaskimiin, aurinkokäyttöisiin kännykänlatureihin yms. pienlaitteisiin voimanlähteeksi. Esimerkkinä aurinkopaneelien monikäyttöisyydestä on kuvassa 4.2 oleva Voltaic Systemsin valmistama reppu, jolla pystytään lataamaan kannettavia tietokoneita, kännyköitä yms. Reppu maksaa n. 150 euroa ja sen latausteho on n.15 wattia.



Kuva 4.2 Aurinkosähköreppu (Voltaic Systems, 2009)

Ohutkalvoteknologian yleistyessä ja kehittyessä aurinkopaneeleita saadaan integroitua huomattavasti nykyistä helpommin erilaisten tuotteiden yhteyteen, sillä kalvot ovat taipuisia, toisin kuin nykyisin käytössä olevat kiteiset materiaalit. Tulevaisuudessa aurinkopaneeleita voidaankin todennäköisesti nähdä myös täysin uusissa käyttökohteissa.

Aurinkopaneelien lisäksi aurinkosähköjärjestelmä tarvitsee toimiakseen myös laitteiston, joka ohjaa tuotantoa ja syöttää sähkön eteenpäin joko kulutuslaitteille, akustoon tai yleiseen sähköverkkoon.

Kuvassa 4.3 on esitetty muutaman sadan watin aurinkosähköjärjestelmissä käytetty tyypillinen invertteri Steca Grid 300. Invertteri tarvitaan, kun aurinkopaneelien tuottama sähkö vaihtosuunnataan, jolloin se voidaan syöttää vaihtosähköverkkoon. Tämän jälkeen sähköä voidaan hyödyntää missä tahansa normaalissa vaihtojännitteellä toimivassa sähkölaitteessa. Jos aurinkosähköä halutaan varastoida akkuihin, tarvitaan lataussäädin, joka tarkkailee akuston varaustasoa ja ohjaa paneelien tuottoa, etteivät akut eivätkä pääse yllilatautumaan ja toisaalta että akkujen varaustaso ei pääse laskemaan liian alas. Lataussäätimiä käytetään silloin, kun sähköjärjestelmä toteutetaan tasajännitteellä, tyypillisesti siis off-grid kohteissa. Esimerkki lataussäätimestä on kuvassa 4.4.



Kuva 4.3 Steca Grid 300 (Steca, 2009)



Kuva 4.4 Steca PR 3030 (Steca, 2009)

Näiden lisäksi aurinkosähköjärjestelmiin myydään erilaisia näyttöjä, tuotannon määrää tarkkailevia dataloggereita, kaukosäätimiä ja releitä.

Oman ryhmänsä muodostavat myös tasasähkökäyttöä ajatellen suunnitellut jääkaapit, televisiot, vesipumput ja valaisimet jotka toimivat suoraan 12 tai 24 voltin tasajännitteellä.

## 4.2 Aurinkosähköjärjestelmien kustannukset tänä päivänä

Liitteeseen 4. on kerätty tietoja kuluttajille myytävien aurinkopaneelien hinnoista tänä päivänä, sekä muutama esimerkki kokonaisten pienimuotoisten aurinkosähköjärjestelmien hinnoista. Tiedot on kerätty liikkeistä joiden hinnasto löytyi internetistä. Näiden lisäksi myös monet rautakaupat, venetarvikeliikkeet yms. vapaa-ajan tarvikkeita myyvät liikkeet kauppaavat aurinkopaneeleita, mutta useimpien sivuilta ei ollut suoraan saatavissa hintatietoja, joten ne on jätetty tästä syystä pois vertailusta. Liitteen 4. taulukko on järjestetty €/W-kriteerin mukaan.

Taulukkoa tarkasteltaessa on huomattavissa, että yleisesti otettuna tuotetun sähkön euromääräinen hinta tippuu, kun aurinkosähköjärjestelmän kokoa kasvatetaan. Tällä hetkellä halvimmillaan aurinkosähkö maksaa siis n. 5€/W kesämökkijärjestelmiä ajatellen, jos huomioidaan pelkästään paneelien hinta. Suuremman mittakaavan järjestelmissä kustannukset saadaan painettua yleensä tätä alemmaksi, mutta näiden vertailua ei otettu mukaan tähän tutkimukseen.

Aurinkosähköjärjestelmä vaatii paneelien lisäksi myös muita komponentteja, joiden tarve riippuu järjestelmän tyypistä. Tyypillisimmät näistä ovat invertterit ja lataussäätimet, sillä jompi kumpi näistä vaihtoehtoista tarvitaan aina aurinkosähköjärjestelmän tyypistä riippuen. Esimerkkejä kuluttajille myynnissä olevien inverttereiden ja lataussäädinten hinnoista on liitessä 5.

Mikäli halutaan rakentaa tasasähköjärjestelmä, lataussäätimen lisäksi tarvitaan myös akusto jonka kapasiteetti tulee mitoittaa sähkönkulutuksen mukaan. Tämä voi osaltaan nostaa järjestelmän hintaa huomattavasti. Invertterejä käytetään tyypillisesti yleiseen sähköverkkoon kytketyissä järjestelmissä, joissa aurinkosähköä käytetään muun sähköntuotannon ohella.

Inverttereiden tai säädinten lisäksi tarvitaan kaapeleita, kytkimiä, releitä yms. riippuen siitä mitä kaikkea järjestelmään halutaan kytkeä. Näiden osuus aurinkosähköjärjestelmän kokonaishinnasta vaihtelee tapauskohtaisesti, mutta se jää yleensä murto-osaan paneelien hankintakustannuksista.

Liitteen 4. kauppohen hintojen pohjalta laskettuna esimerkkinä verkkoon kytkettävälle 135 watin järjestelmälle hintaa tulisi (kaapelointi yms. poislukien) halvimmillaan: paneeli 629 € (Kyocera KD 135) + invertteri 275 € (Steca Grid 300 T) = 904 €.

Vastaavalle off-grid järjestelmälle hintaa tulisi: paneeli 629 € (Kyocera KD 135) + lataussäädin 49€ (Solara SR 135 TL ) = 678 € + akut.

Tässä esimerkissä on huomioitava, että off-grid-ratkaisu on minimimitoitettu, eli se ei salli lisäpaneelien lisäämistä ilman lataussäätimen vaihtoa, kun taas invertterin kapasiteetti riittää myös vielä toisen samanlaisen paneelin lisäämiseksi. Off-grid ratkaisun hintaan täytyy lisätä myös järjestelmän vaatimat akut. Ne on jätetty vertailusta pois, sillä akuston koon mitoitus vaihtelee suuresti käyttötarkoituksesta riippuen. Tyypillisesti ne lisäävät hintaa kuitenkin sen verran, että järjestelmälle tulee hintaa vähintään saman verran kuin verkkoon kytketylle saman tehoiselle järjestelmälle.

Akkujen varauskapasiteetti myös laskee ajan mittaan, joten jossain vaiheessa ne täytyy uusia, mikä lisää huoltokustannuksia.

Solpros Oy:n tekemän selvityksen mukaan 1 W<sub>p</sub> aurinkoenergiaa tuottaa vuodessa hyvissä olosuhteissa n. 1 kWh. Jos aurinkosähköjärjestelmän eliniäksi lasketaan 25 vuotta, 1 W<sub>p</sub> aurinkopaneeli ehtii tällöin tuottaa 25 kWh ja 135 W<sub>p</sub> –paneeli 3375 kWh. Mikäli ajatellaan että verkosta ostetun sähkön hinta pysyisi koko tämän ajan nykyisellä tasollaan, n. 12,5 snt/kWh, joka sisältää energian hinnan + siirtohinnan, (Energiamarkkinavirasto, 2009), tulisi vastaavan verkosta ostetun sähkömäärän hinnaksi 422 €.

Jos siis verrataan edellä laskettuja verkkoon kytketyn ja off-grid järjestelmien hintoja tähän, ei aurinkosähkön rakentaminen ole vielä nykyisillä sähkön hinnoilla kannattavaa. Pitää tosin huomioida että tässä laskelmassa ei ollut mukana inflaation ja sähkön tulevaisuudessa todennäköisesti nousevan markkinahinnan vaikutusta, ja toisaalta aurinkosähkön tuotanto-olosuhteet oletettiin hyviksi, vaikka tosiasiassa vuodet ovat keskenään usein hyvin erilaisia, jolloin auringon säteilyä ei tule joka vuosi yhtä paljon.

Toistaiseksi aurinkosähkö on vielä korkeiden pääomakustannusten takia sen verran kallista, että sen käyttö on kannattavaa lähinnä kohteissa, jotka ovat yleisen sähköverkon ulottumattomissa. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi veneet, asuntovaunut ja saarella olevat kesämökit. Aurinkosähkön hankinta on tällaisten kohteiden ulkopuolella nykyään kannattavaa lähinnä imagosyistä, sillä aurinkosähköjärjestelmän hankinnalla esimerkiksi yritys voi osoittaa että on kiinnostunut uusiutuvan energiantuotannon tukemisesta.

Sähkön hinnan noustessa ja aurinkoenergian tuotantokustannusten laskiessa valmistusmäärien kasvamisen ja teknologisen kehityksen myötä, aurinkosähköjärjestelmien integrointi myös asuintalojen yhteyteen tulee nykyistä houkuttelevammaksi.

## 5 Kartoitus Suomessa toteutetuista aurinkosähköjärjestelmistä

Tässä luvussa on esitelty Suomessa toteutettuja aurinkosähköjärjestelmiä ja niistä saatuja käyttökokemuksia. Tässä on keskitytty vain suuremman mittakaavan projekteihin, sillä mökkikäytössä tyypillisiin pienempiin off-grid ratkaisuihin perehdytään tarkemmin luvussa 6 diplomityön yhteydessä toteutetun asennusjärjestelyn pohjalta.

Jo toteutettujen projektien lisäksi lopussa kerrotaan myös lyhyesti näkemyksiä siitä, mitä tulevaisuuden aurinkosähköprojekteja on suunnitteilla Suomessa ja muualla. Tämän perusteella voi saada käsityksen siitä, mitä kaikkea aurinkosähköllä voidaan tulevaisuudessa toteuttaa ja toisaalta myös mitä haasteita siihen liittyy.

### 5.1 Suomessa toteutettuja aurinkosähköprojekteja

Toistaiseksi aurinkosähkön rakennus on Suomessa ollut melko vähäistä ja suurin osa järjestelmistä on ollut pieniä, lähinnä mökki- tai venekäyttöön tarkoitettuja järjestelmiä. EU:n asettamat ilmastotavoitteet ja ylipäätään lisääntynyt kiinnostus uusiutuvien energianlähteiden käyttöön on kuitenkin lisännyt kiinnostusta myös aurinkoenergian laajamittaisempaan hyödyntämiseen. Tässä kappaleessa esitellään muutamia jo toteutettuja aurinkosähköprojekteja Suomessa. Yhteistä näille kaikille on, että niillä ei ole edes yritetty kattaa kokonaan kohteen energiantarvetta, vaan niitä käytetään lisävoimana esimerkiksi kesäaikaan jäähdytyksen vaatiman sähkön tuotannossa.

#### 5.1.1 Kiilto Oy:n tehdas, Lempäälä

Tällä hetkellä Suomen suurin aurinkosähköjärjestelmä on asennettu Kiilto Oy:n kemian tehtaan katolle Lempäälässä. Laitos käsittää kaikkiaan 332 etelään päin kallistettua aurinkopaneelia, jotka on asennettu 1400 m<sup>2</sup> kokoiselle alueelle. Tästä aurinkopaneelien pinta-alan osuus on 436,3m<sup>2</sup>. Teholtaan aurinkosähkölaitos on 66 kW<sub>p</sub> ja sen vuosituotto on n. 60,45 MWh. Järjestelmän on toimittanut Naps Systems Oy. (Kiilto Oy, 2008)

Lisätietoja Kiilto Oy:n aurinkovoimalasta on luvussa 5.2.



Kuva 5.1 Kiilto Oy:n tehtaan katolle asennettu aurinkosähköjärjestelmä



### 5.1.2 NCC:n pääkonttori, Mannerheimintie, Helsinki

NCC:n Helsingissä sijaitsevan pääkonttorin katolle ja itäiselle julkisivulle asennettiin vuonna 2004 yhteensä 147 m<sup>2</sup> aurinkopaneeleita. Katolle asennetut paneelit on kallistettu etelään päin ja ne on jaettu 5 riviin, joissa kussakin on 33 kappaletta 100Wp moduulia. Katon paneelien huipputeho on 16,5 kWp.

Julkisivun paneelit ovat puoliläpäisevää tyyppiä ja ne on asennettu 7. kerroksen ikkunoiden yhteyteen. Näiden yhteisteho on 0,8 kWp. Järjestelmän kokonaishuipputeho on siis 17,3 kWp. Vuositasolla järjestelmä tuottaa n. 15 MWh.



Kuva 5.2 NCC:n pääkonttori Mannerheimintiellä Helsingissä

Koska paneelit on asennettu useaan riviin, alhaisilla auringon tulokulmilla edellinen rivi varjostaa osan seuraavasta. Tämä nähdään myös kuvasta 5.3. Varjostusta on pyritty vähentämään nostamalla takimmaisat rivit etummaisiksi hieman ylemmäksi kuvien 5.4a ja 5.4b osoittamalla tavalla.





Kuva 5.3 NCC:n pääkonttorin kattopaneelit

Kuva 5.4a Ensimmäinen rivi

Kuva 5.4b viimeinen rivi

NCC:n aurinkosähköjärjestelmän asennus toteutettiin uudisrakennuksen rakennusvaiheessa ja sen osuus kokonaiskustannuksista oli n. 1%. Tämä sisältää projektin saaman EU-rahoituksen, sillä se oli osa vuosina 2002-2004 toteutettua PV-Nord hanketta. Naps Systems Oy toimitti aurinkopaneelit tähän projektiin. (PV-Nord, 2005)

### 5.1.3 As. Oy Salvia, Ekoviikki, Helsinki

Kahdeksankerroksisen asuinrakennuksen etelä- ja länsipuolen parvekkeiden lasikaiteiden tilalle on asennettu yhteensä 288 m<sup>2</sup> aurinkopaneeleita. Järjestelmän huipputeho on 24 kW<sub>p</sub> ja vuodessa se tuottaa n. 18 MWh.

Aurinkopaneelit on pyritty integroimaan mahdollisimman hyvin rakennuksen yleisilmeeseen kuvien 5.5 a) ja b) osoittamalla tavalla. Esimerkiksi paneelien johdot on piilotettu niin että ne eivät ole asukkaiden näkyvillä parvekkeelta.

Aurinkosähköjärjestelmän hinnaksi tuli noin 1% rakennusprojektin kokonaishinnasta ja sen toimitti Naps Systems Oy.

As. Oy Salvia on osa suurempaa ekologisen rakentamisen tutkimusprojektia Helsingin Viikissä ja se oli osa PV-Nord hanketta vuosina 2002-2004. (PVNord, 2004)



a) Rakennuksen eteläinen ja läntinen julkisivu



Paneelit on kytketty sarjaan ja kaapelit on piilotettu kaideprofiiliin sisään

b) Paneelien asennustapa

Kuva 5.5 Ekoviikki-projektin aurinkopaneelit (Pirrretty lähteen mukaan, PVNord, 2004)

#### 5.1.4 Teknillisen korkeakoulun Valotalo, Espoo

Teknillisen korkeakoulun sähköosaston G-siiven, eli niin sanotun Valotalon ikkunoiden yhteyteen on integroitu 7 kW<sub>p</sub> aurinkopaneeleita, jotka on kytketty sähköverkkoon invertterien välityksellä. Järjestelmä koostuu 140 kappaleesta 50 kW<sub>p</sub> -paneeleita, jotka on asennettu melko loivaan, n. 30° kallistuskulmaan arkkitehtonisista syistä. Paneelien yhteenlaskettu pinta-ala on 60 m<sup>2</sup>.

Vuodessa järjestelmä tuottaa noin 4,4 MWh sähköä. Järjestelmään on kytketty dataloggeri, joka välittää Valotalon yhteydessä olevan kahvilan seinälle asennettuun näyttöön tietoa järjestelmän tuottamasta sähköstä.

Järjestelmän toimitti Naps Systems Oy.



Kuva 5.5 TKK:n Valotalon aurinkopaneelit (Sisäpiiri, 2001)

#### 5.1.5 Citymarket Lielahdi, Tampere

Tampereen Lielahdella sijaitsevan Citymarketin katolle on asennettu 39 kW<sub>p</sub> aurinkosähköjärjestelmä. Paneelien yhteispinta-ala on 330 m<sup>2</sup>. Keskikesällä aurinkosähköllä pystytään tuottamaan noin 5% marketin kuluttamasta sähköenergiasta. Aurinkosähköjärjestelmä asennettiin osana myymälän laajennusprojektia, jossa keskityttiin hakemaan ympäristöystävällisiä ratkaisuja. Aurinkosähköjärjestelmän toimitti Naps Systems Oy. (Naps, 2008)



Kuva 5.6 Citymarket Lielahden aurinkopaneelit

## 5.2 Käyttökokemuksia aurinkosähköjärjestelmistä

Luvussa 6 esiteltyjen kokemusten lisäksi tässä työssä suoritettiin kysely myös Suomen tämän hetken suurimman aurinkosähköjärjestelmän toiminnasta. Näin pyrittiin selvittämään myös pitemmän aikavälin kokemuksia siitä, miten aurinkosähkö soveltuu käytettäväksi Suomen olosuhteissa ja saatiin vertailutietoa itse toteutettavaa projektia varten.

Tämä luku perustuu siis suoraan aurinkosähkön käytöstä yrityksessä vastanneen henkilön kokemuksiin ja vastaukset ovat suoria lainauksia haastateltavalta. Esitetyt kysymykset on merkitty kirjaimella K ja vastaajan vastaukset kirjaimella V.

Kysely suoritettiin 2.2.2010. Aurinkosähköjärjestelmä asennettiin vuoden 2008 lopussa Kiillon tehtaalle, joten tässä vastausten ajanhetkellä se oli ollut toiminnassa vähän yli vuoden.

**Kohde:** Kiilto Oy:n tehdas, Lempäälä.

**Vastaaja:** Vesa Juhannusvuori, Kunnossapitopäällikkö

Aurinkopaneelien asennusvuosi:	12/2008
Aurinkosähköjärjestelmän toimittaja:	NAPS Systems Oy
Aurinkopaneelien tyyppi:	monikide-pii
Aurinkopaneelien lukumäärä:	332 kpl
Paneeliston yhteenlaskettu pinta-ala:	436 m <sup>2</sup>
Aurinkosähköjärjestelmän teho:	66 kW <sub>p</sub>
Paneelien asennuspaikka:	tehdashallin katto,
Paneelien kallistuskulma:	valmistajan normaali asennuskulma (ei ilmoitettu tarkemmin, kuvien perusteella n. 45°)

K: Mikä on aurinkopaneelien rooli sähköntuotannossa teidän tehtaallanne, eli mihin kaikkeen aurinkosähköä käytetään?

V: Tuotettu sähkö syötetään kahteen eri IV-jakokeskukseen ja kaikki aurinkosähkö käytetään tehtaan alueella. Aurinkovoimalaitoksen sähköntuotto on noin 1% tehtaan vuosikulutuksesta, maksimissaan 10% hetkelliskulutuksesta.

K: Onko paneelien yhteyteen asennettu jäähdytys- tai lämmitysjärjestelmiä?

V: Ei ole.

K: Ovatko paneelit ympärivuotisessa käytössä, vai hyödynnetäänkö niitä vain osan aikaa vuodesta?

V: Paneelit ovat ympärivuotisessa käytössä, talvella sähköä ei tule lainkaan tai tulee vähän.

K: Hyödynnetäänkö kaikki tuotettu sähkö suoraan omassa toiminnassanne, vai syötetäänkö sitä osan ajasta myös yleiseen sähköverkkoon?

V: Kaikki aurinkosähkö käytetään tehtaan alueella

K: Ovatko järjestelmän sähköntuotot vastanneet odotuksia?

V: Ensimmäisen vuoden kokonaistuotto oli noin 48 MWh, joka jäi noin 20%

odotetusta.

- K: *Onko järjestelmälle laskettu takaisinmaksuaikaa ja ollaanko siihen pääsemässä kokemusten perusteella?*
- V: On laskettu, kokemusten perusteella laskelma on hieman optimistinen.
- K: *Mitä ongelmia aurinkosähkön kanssa on ollut (sään aiheuttamat ongelmat, tekniset viat, tms)?*
- V: Yksi tekninen vika so. viallinen johdonsuoja. Ei muita ongelmia.
- K: *Miten kannattavana näette aurinkosähkön käytön ylipäättään kokemusten perusteella teollisessa käytössä?*
- V: Panos/tuottorakenteen pitää panantua, jotta energiamuodon käytöllä on edellytyksiä yleistyä.
- K: *Onko Kiilto Oy:n suunnitelmissa laajentaa aurinkosähkön osuutta? Entä muiden uusiutuvien energianlähteiden?*
- V: Eri uusiutuvia energiamuotoja ja niiden kehitystä tarkastellaan jatkuvasti. Ajatuksia sekä aurinkoenergian ja lämpöpumpputekniikan hyödyntämiseksi tehtaalla on olemassa.

Liitteestä 5 löytyy esimerkkejä Kiilto Oy:n voimalan tuotannosta.

### **5.3 Aurinkosähkön tulevaisuudennäkymät Suomessa ja maailmalla**

Uusiutuvien energianlähteiden luonnonvarat ovat suuret, sillä nykyinen energiankulutus voitaisiin kattaa niillä teoriassa 10000 kertaisesti (Lund, 2009).

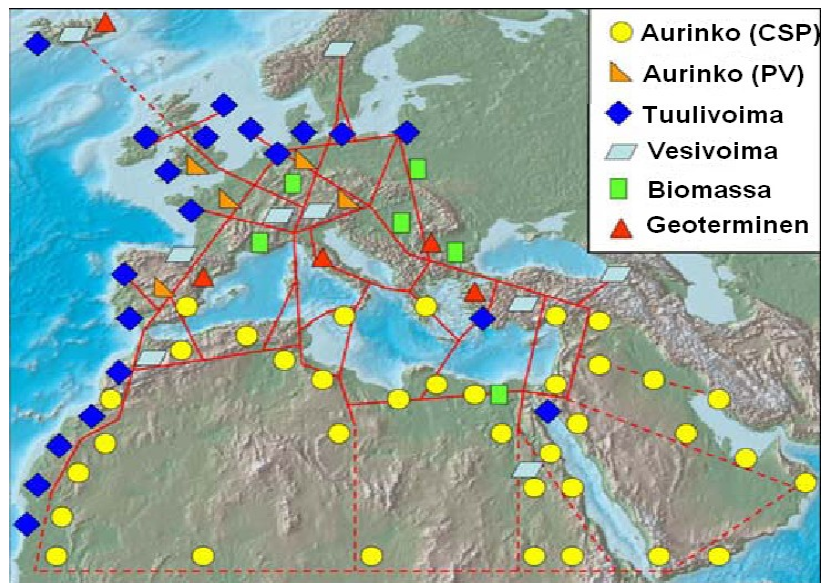
Järkevästi hyödynnettävissä näistä on kuitenkin huomattavasti vähemmän, mutta hyödynnettävänkin energian osuus on noin 10 kertainen maailman nykyiseen energiatarpeeseen nähden.

30 vuoden päästä aurinkoenergian oletetaan olevan jo massatuotannossa, halventuneen ja hyötysuhteeltaan kehittyneen teknologian myötä ja sillä voidaan tuottaa arviolta 4000-6000 TWh aurinkosähköä. Suomessa voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää n. 4-7 TWh aurinkolämpöä ja 2-10 TWh aurinkosähköä. (Lund, 2009)

Aurinkosähkössä onkin tulevaisuudessa näköpiirissä suurta kehitystä sekä laitetasolla, että järjestelmien lisääntyvänä määränä.

Kunnianhimoisin tulevaisuuden hankkeista on EUMENA-Desertec, joka on Rooman klubin alunperin alkuun saattama projekti, jonka tarkoituksena on tuottaa suurin osa EU:n, Lähi-Idän ja Pohjois-Afrikan sähköntarpeesta uusiutuvilla energianlähteillä. Tämä käsittää laajamittaisen aurinkoenergian tuotannon aavikkoalueilla, tuulivoiman rakentamisen Euroopan ja Pohjois-Afrikan rannikko-alueille ja lisäksi muiden uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämisen kuvan 5.7 osoittamalla tavalla. (Desertec, 2009)





Kuva 5.7 EUMENA-Desertec ohjelman periaatekuva  
(Piirretty lähteen mukaan: Lund, 2009)

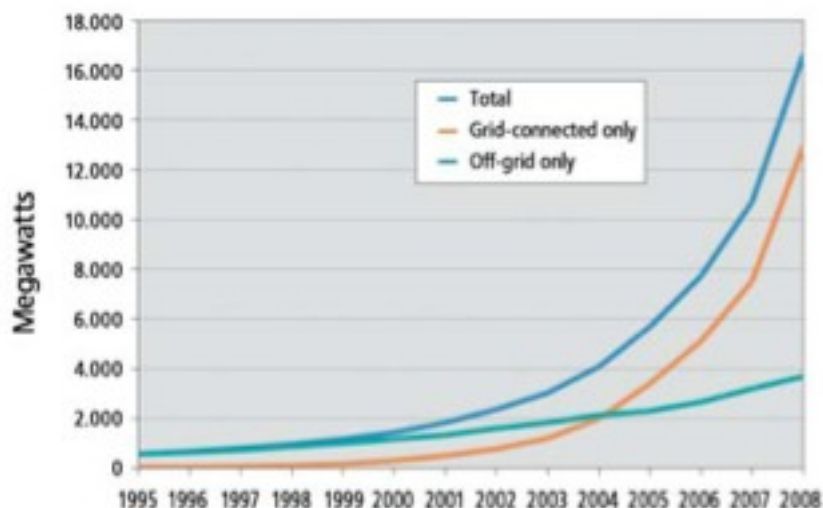
Energiantuotantolaitosten lisäksi tämä edellyttää myös huomattavaa panostusta siirtoverkkojen rakentamiseen. Sähkön siirtolinjat on tarkoitus toteuttaa HVDC-tasavirtajärjestelmillä siirtohäviöiden pienentämiseksi. Sähkön saannin turvaamiseksi energiaa tuotetaan monella eri menetelmällä ja sitä voidaan varastoida esimerkiksi vesisäiliöihin lämpönä. Desertec-säätiön laskelmien mukaan alueella voidaan tuottaa jopa 100-kertainen määrä energiaa alueen nykyiseen kulutukseen nähden.

Uusiutuvilla energianlähteillä saavutetaan sähkönsaannin lisäksi etuja myös kasvihuonekaasujen vähenemisen muodossa. Eräs tulevaisuuden suurista haasteista on myös puhtaan veden riittävyys maailman lisääntyvälle väestölle ja Desertec-projektin suurta energiakapasiteettia voitaisiin hyödyntää myös juomaveden tuottamisessa merivedestä, sillä nykyisellään tämä vie hyvin paljon sähköä. Projektin toteuttamiseen vaadittava tekniikka on jo olemassa, mutta se vaatii suuria kustannuksia ja projekti on toistaiseksi suunnitteluvaiheessa. Hankkeen suunnittelussa on EU:n lisäksi mukana myös Lähi-Idän ja Pohjois-Afrikan valtioita.

Mikäli hanke toteutetaan täysimittaisena, rakentaminen vie useita vuosikymmeniä. (Desertec, 2009)

Maailmanlaajuisista aurinkosähkön kehitysnäkymistä löytyy tietoa esim. uusiutuvien energiamuotojen edistämisen tueksi perustetun REN21-yhteenliittymän raportista. Raportin mukaan tällä hetkellä on kolme trendiä joissa aurinkoenergian kasvu on voimakasta. Ensinnäkin BIPV-järjestelmät (*building integrated photo voltaics*), eli rakennuksiin integroidut aurinkosähköjärjestelmät, joita on tällä hetkellä n. 25 MW edestä rakennettuna Euroopassa. Toinen on ohutkalvoteknologian lisääntynyt osuus aurinkopaneeleiden tuotannossa. Kolmas on suurten, eli yli 200 kW laitosten määrän lisääntyminen. Näiden määrä oli lisääntynyt vuoden 2007 lopun tuhannesta kappaleesta vuoden 2008 loppuun mennessä 1800 kappaleeseen maailmanlaajuisesti. Aurinkoenergian kehityskäyriä on esitetty kuvassa 5.8.

(REN21, 2009)



Kuva 5.8 Aurinkoenergian kehitys (REN21, 2009)

Tämänhetken suurin aurinkosähköpuisto löytyy Espanjasta. Parque Fotovoltaico Olmedilla de Alarcón huipputeho on 60 MW<sub>p</sub>. Suurimpien tuotantolaitosten lista on päivittynyt viime vuosina kuitenkin tiheästi, joten tämäkään laitos tuskin tulee pitämään ennätystä kauan voimassa. Ajantasalla olevan listan voi tarkistaa sivulta <http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>. Samasta palvelusta löytyy myös lista suurimmista rakennuksiin integroiduista järjestelmistä ja tämän hetken suurin BIPV-järjestelmä löytyy General Motorsin tehtaan yhteydestä Zaragozasta, joka on myöskin Espanjasta. Tämän BIPV-järjestelmän teho on 11,8 MW<sub>p</sub>. (PVresources.com, 2010)

Suurimmat aurinkoenergian tuottajat ovat tällä hetkellä Espanja ja Saksa. Saksassa valmistui vuoden 2009 lopulla maailman tämän hetken toiseksi suurin aurinkovoimala, jossa 700000 ohutkalvotekniikalla toteutettua aurinkopaneelia on pystytetty käytöstä poistetun sotilastukikohdan alueelle. Voimalan teho on 53 MW. Paneelit peittävät noin 210 jalkapallokentän kokoisen alueen ja järjestelmän hinnaksi tuli noin 160 miljoonaa euroa. (Spiegel, 2009)

Suomessa aurinkoenergian yleistymisen on ollut huomattavasti hitaampaa kuin monessa muussa maassa. Osittain tämä on johtunut syöttötariffijärjestelmän puuttumisesta. Syöttötariffit tekevät aurinkosähköjärjestelmien hankinnasta etenkin pienille sähköntuottajille ja yksityisille henkilöille kannattavampaa, sillä tällöin tuottajalle taataan verkkoon syötetystä sähköstä tietty takuuhinta. Mikäli sähkön markkinahinta on alhaisempi kuin tämä takuuhinta, sähkön kuluttajat ovat velvollisia maksamaan tuottajalle takuuhinnan ja markkinahinnan erotuksen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä että sähköyhtiö maksaa uusiutuvan energian tuottajalle markkinahintaa korkeampaa hintaa sähköstä, ja toisaalta sähköyhtiö perii lisääntyneet kustannukset asiakkailtaan. Syöttötariffijärjestelmällä pyritään kattamaan uusiutuvien energialaitosten rakennuksesta aiheutuvia kustannuksia. Ilman tukitoimia aurinkosähkö ja esimerkiksi tuulivoima ovat toistaiseksi niin paljon kalliimpia kuin perinteisillä tuotantomuodoilla tuotettu sähkö, että niiden rakentaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Suomessa ei ole ainoana Euroopan maana Maltan lisäksi toistaiseksi käytössä syöttötariffijärjestelmää uusiutuville energiamuodoille, vaan ainoastaan turpeelle. Toistaiseksi aurinkosähkön tuotantoa on tuettu sen sijaan vero- ja investointikannustimin. Käytännössä tämä on sähköntuottajalle epäedullisempi

vaihtoehto. Tämänhetkistä Euroopan maihin asennetun aurinkoenergian tuotantokapasiteetin määrää on esitetty taulukossa 5.1. Tästä nähdään että Suomi on aivan häntäpäässä rakennetun aurinkoenergian tuotantolaitosten määrässä.

Taulukko 5.1 Euroopan maihin asennetut aurinkosähköjärjestelmät vuonna 2008  
(Europes Energy portal, 2010)

sijoitus	valtio	asennettua aurinkosähköä [Mw <sub>p</sub> ]
1	Espanja	2671 (2007: 591 )
2	Saksa	1505 (2007: 1103 )
3	Italia	197,3 (2007: 70,2 )
4	Tšekki	50,3 (2007: 3,1 )
5	Portugali	50,3 (2007: 14,5 )
6	Belgia	49,6 (2007: 17,2 )
7	Ranska	44,5 (2007: 12,8 )
8	Kreikka	9,3 (2007: 2,5 )
9	Iso-Britannia	3,5 (2007: 3,8 )
10	Itävalta	2,5 (2007: 2,1 )
11	Ruotsi	1,7 (2007: 1,4 )
12	Alankomaat	1,6 (2007: 1,6 )
13	Bulgaria	1,3 (2007: 0,1 )
14	Slovenia	1,1 (2007: 0,6 )
15	Puola	1 (2007: 0,2 )
16	Kypros	0,8 (2007: 0,3 )
17	Suomi	0,5 (2007: 0,5 )
18	Luxembourg	0,5 (2007: 0,2 )
19	Romania	0,2 (2007: 0,1 )
20	Malta	0,1 (2007: 0,1 )
21	Tanska	0,1 (2007: 0,1 )
22	Unkari	0,1 (2007: 0,1 )
23	Slovakia	0,1 (2007: 0,1 )
24	Liettua	0,1 (2007: 0,1 )
25	Viro	0,1 (2007: 0,1 )
26	Irlanti	0 (2007: 0 )
27	Latvia	0 (2007: 0 )
<b>Yhteensä EU</b>		<b>4592,3 (2007: 1825,6 )</b>

Syöttötariffien vaikutusta energian hintaan on pohtinut myös TKK:n energiatalouden professori Pekka Pirilä. Lopputuloksena pohdinnassaan (Pirilä, 2009) Pirilä esittää että Saksan markkinoiden kokemuksen perusteella uusiutuvan energian tuotannon voimakas tukeminen syöttötariffeilla nostaa sähkön hintaa kohtuuttomasti, etenkin aurinkosähkön tapauksessa. Näkemys perustuu *Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung* (RWI)-raporttiin, jossa on tultu siihen tulokseen että liian voimakas syöttötariffipohjainen järjestelmä tekee etenkin uusien energiamuotojen tapauksessa sähköntuotannosta tehotonta.

Tämä johtuu siitä että syöttötariffit tekevät kannattavaa nimenomaan voimaloiden rakentamisesta, ei niinkään siitä että niiden kehitykseen panostettaisiin, mikä nostaisi osaltaan niiden tehokkuutta. Tällöin tuotantokapasiteettia tehdään kyllä lisää, mutta se voi olla heikkolaatuista ja sen asennuspaikat epäedullisia. Tämän takia syöttötariffit ovat hyvä vaihtoehto lähinnä siinä vaiheessa, kun uusi tekniikka on lähellä kilpailukykyä



verrattuna muihin energiantuotantomuotoihin hintansa puolesta ja tuleva tariffipolitiikka tekee niistä kilpailukykyisiä jo niiden elinaikana. Tällöin niiden tuominen osaksi sähköntuotantojärjestelmää on perusteltua. Myös sarjatuotannon kannattavuuskynnyksen ylittäminen on hyvä peruste syöttötariffin kaltaisille tukitoimille. Sen sijaan se ei sovi pahasti kehitysvaiheessa olevan teknologian edistämiseen, jollaiseksi myös aurinkoenergia tässä lasketaan. Siihen on syytä käyttää tarkemmin kohdennettuja ja laajuudeltaan säädeltyjä tukitoimia, kuten tutkimusrahoitusta ja demonstraatiolaitosten investointitukia. Mikäli syöttötariffin on oltava hyvin korkea toimiakseen, on se väärä tukimuoto. (Pirilä, 2009)

Uusia hankkeita on aurinkosähkön nykyisestä kalleudesta riippumatta kuitenkin suunnitteilla myös Suomessa ja eräs näistä on Sunvoima Oy:n aurinkovoimala, josta on tarkoitus tulla maamme suurin. Voimalan tuotannon on tarkoitus alkaa keväällä 2011 ja sen tehoksi tulee 1 megawatti ja vuosituotoksi tulee noin 1000 MWh. Voimalaa ei ole vielä alettu rakentaa, sillä sopiva rakennuspaikka on vielä haussa. Yrityksen nettisivuilla ([www.sunvoima.fi](http://www.sunvoima.fi)) on mahdollista ostaa osuus voimalasta ja saada siis näin tuotanto-osuutta vastaava määrä aurinkosähköä käyttöönsä. Sunvoima myy osuuksia 100 W erissä ja osuuden hinnaksi on määritetty 600 euroa, joka oikeuttaa tuotantoon 20 vuodeksi. Jos osuuden ostaja ei käytä itse ostamaansa sähköä, Sunvoima lupaa maksaa siitä 0,12 eur/kWh.

Aurinkosähkö on toistaiseksi kallista verrattuna useimpiin perinteisiin energialähteisiin ja tämän vuoksi sen edistäminen edellyttää tukitoimia valtiolta ja syöttötariffijärjestelmän käyttöönottoa jossain muodossa. Syöttötariffeja suunniteltaessa on kuitenkin syytä miettiä niiden vaikutusta sähkönhintaan ja pyrkiä löytämään ratkaisu josta ei aiheutuisi kohtuutonta hinnannousua kuluttajille.

Osaltaan aurinkoenergian lisääntymistä on hidastanut myös pohjoisten olosuhteiden tuomat haasteet, sillä se aika vuodesta milloin aurinkoenergiaa voidaan meillä hyödyntää tehokkaasti on huomattavasti lyhyempi kuin vaikkapa Espanjassa. Kiinnostus uusiutuvien energianlähteiden lisäämiseen on kuitenkin jatkuvasti kasvussa ja osaltaan tätä edistävät myös EU:n asettamat päästötavoitteet. Aurinkoenergian määrä tuleekin hyvin todennäköisesti kasvamaan maassamme tulevaisuudessa, mutta kovin laajamittaiseen tuotantoon se tuskin tulee leviämään ainakaan ilman voimakkaita tukitoimia.

## 6 Demonstraatio: Aurinkopaneelit ja LED-valaistusjärjestelmä

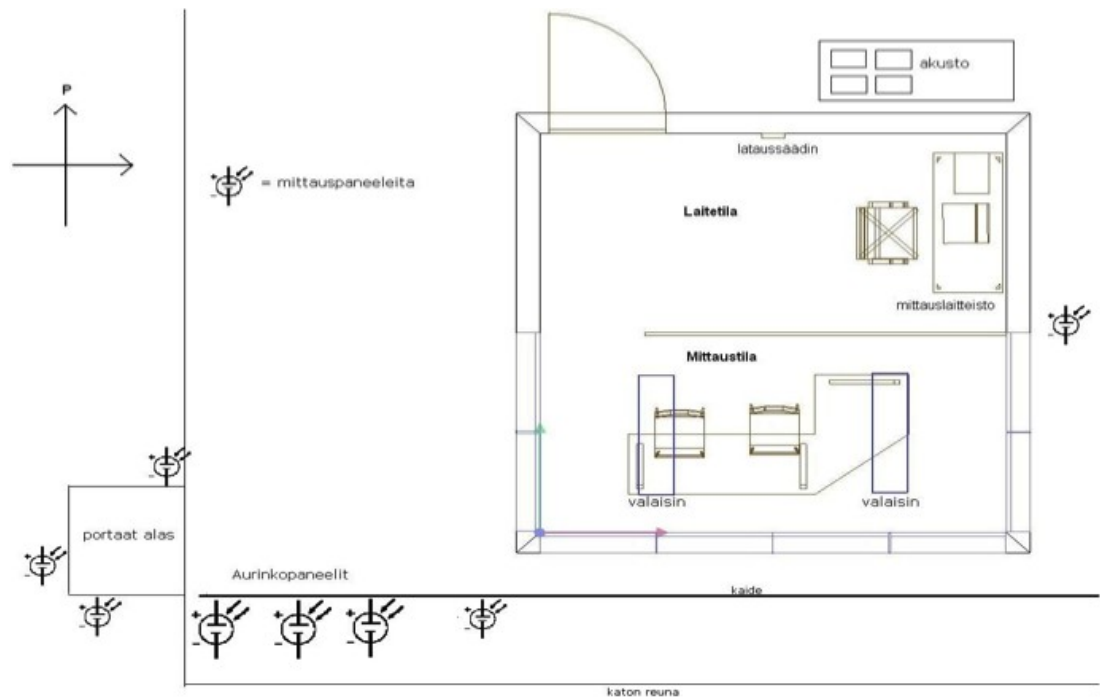
Tässä luvussa perehdytään tarkemmin diplomityön yhteydessä toteutettuun off-grid ratkaisuun, jossa led-valaistus yhdistettiin aurinkosähköjärjestelmään tasajännitteellä. Tällä tavoin pyrittiin saamaan käytännön tietoa pienimuotoisen aurinkosähköjärjestelmän soveltuvuudesta valaistuskäyttöön Suomen olosuhteissa.

### 6.1 Demonstraation järjestelyt

Ratkaisu toteutettiin täysin off-grid periaattella, eli siinä pyrittiin tutkimaan tilannetta jossa ei ole saatavilla vaihtosähköä yleisestä sähköverkosta, tai sitä ei jostain syystä haluta käyttää. Tosielämässä tällainen tilanne voi olla vaikkapa kesämökillä, kehitysmääolosuhteissa, tutkimusasemalla kaukana yleisen sähköverkon ulkopuolella tai maaseutuolosuhteissa sähkökatkon aikana. Sähkönsaantia pyrittiin turvaamaan varustamalla järjestelmä akustolla, jolloin sen toimintavarmuus paranee huomattavasti, sillä aurinkoenergian tuotanto vaihtelee huomattavasti erilaisten tekijöiden johdosta. Seuraavassa on kerrottu aurinkosähköjärjestelmän asennuksesta sekä erilaisista seikoista mitä pitää huomioida sellaista suunniteltaessa.

#### 6.1.1 Asennuspaikka ja asennusjärjestelyt

Asennus toteutettiin Espoon Otaniemessä sijaitsevan Teknillisen korkeakoulun Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunnan yhteydessä olevan Valotalon katolla olevaan lasikuutioon ja sen ympäristöön. Lasikuution ulkomitat olivat 4 m x 4m x 2,5 m. Koalueen pohjapiirros on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1 Koalueen pohjapiirros

Mittausjärjestelyissä päädyttiin jakamaan sisätila symmetrisesti kahteen osaan, siten että varsinainen valaistuksen mittausalue oli 4 m x 4 m x 2,5 m ja toinen samankokoinen tila eristettiin ohuella väliseinällä "konehuoneeksi". Tähän tilaan tuli siis mittauksissa käytetty laitteisto, sekä aurinkopaneelien ja akkujen välissä oleva lataussäädin.

Varsinaiseen mittaustilaan rakennettiin yksinkertaistettu malli toimistohuoneesta, eli käytännössä tyhjä tila jonka keskellä oli toimistopöytä sekä tuoleja. Mittaustilan kattoon asennettiin koetta varten rakennetut valaisimet.

Lasikuution ulkopuolelle asennettiin yhteensä 8 kappaletta aurinkopaneeleja. Näistä 5 olivat mittausta varten asennettuja 0,09 m<sup>2</sup> paneeleja, joilla tutkittiin auringon säteilyn voimakkuutta eri ilmansuunnissa. Varsinainen sähköteho otettiin etelän puolelle kiinteästi asennetuista kolmesta 0,72 m<sup>2</sup> paneelistä.

Mittauspaneelien sijoituksessa ideana oli, että jokaiseen ilmansuuntaan oli yksi kiinteästi pystysuoraan asennettu paneeli. Näin pyrittiin selvittämään miten suuri ero sähköntuotannon kannalta on ilmansuunnan valinnalla paneelien asennuksessa. Pystysuoraan asennettujen paneelien lisäksi etelän puolella oli toinen paneeli, johon rakennettiin mahdollisuus muuttaa kallistuskulmaa aurinkoon nähden. Tämän tarkoituksena oli selvittää miten tuotetun sähkön määrä muuttuu pystysuoran asennuskulman muuttuessa. Referenssinä käytettiin siis kiinteästi samaan ilmansuuntaan asennettua paneelia. Atsimuuttikulman muutosta, eli muutosta etelän suunnasta itään tai länteen päin, ei tässä yhteydessä tutkittu muuten kuin kiinteiden pääilmansuuntien osalta. Tämä valinta tehtiin koska mittausajankohtana, eli talvella, auringon säteilyn tulosuunta oli lähes suoraan etelästä.

Sähkön tuottoa varten asennetut suuremmat paneelit pyrittiin asentamaan tuotannon kannalta optimaaliseen asennuskulmaan auringon suhteen. Koska kysymys oli kiinteästi asennetuista paneeleista, jouduttiin tyytymään kompromissiin, sillä optimaalinen kulma vaihtelee vuodenajan mukaan. Asennuksessa pyrittiin siis selvittämään sähköntuotannon kannalta mahdollisimman optimoitu asennuskulma demonstraatioon sähköä tuottaville 0,72 m<sup>2</sup> aurinkopaneeleille.

Asennuskulman selvittämiseksi tutkittiin NASA Surface meteorology and Solar Energy datan (NASA Surface Meteorology database, 2009), Naps systemin sekä C. L. Cheng et al-ryhmän (Cheng, C.L. & Sanchez Jimenez, Charles S. & Meng-Chieh Lee, 2009) tekemiä laskelmia. Näiden perusteella päädyttiin lopulta asentamaan paneelit 48° kulmaan horisonttiin nähden siten, että paneelit osoittivat kohti etelää. Talvella kulma olisi saanut olla vieläkin suurempi ja toisaalta kesällä huomattavasti loivempi, mutta tämä oli kompromissina kuitenkin suhteellisen hyvä vuosituotannon optimoimisen kannalta.

Liitteestä 3 löytyy NASA:n sivuilta löytyvän laskentaohjelman avulla tehty taulukko, jossa on laskettu auringon säteilyn määrää eri tavalla kallistetuille pinnoille.

Paneeleihin olisi voitu rakentaa myös auringon säteilyn tulokulman seurantajärjestelmä, joka kääntäisi paneelit kulloinkin parhaaseen asentoon. Tämä olisi kuitenkin nostanut järjestelmän kustannuksia huomattavasti, sekä kuluttanut osan tuotetusta energiasta. Pohjoisissa olosuhteissa jäätyminen asettaa myös omat ongelmansa auringon asemaa seuraavan järjestelmän käytölle. Jäätyminen esto edellyttäisi lämmitystä, joka kuluttaisi myös energiaa, joten tyypillisissä aurinkoenergian käyttökohteissa seurantajärjestelmän asentaminen ainakin ympärivuotiseen käyttöön on näillä leveysasteilla kannattavuudeltaan kyseenalaista.

### 6.1.2 Laitteisto

Tutkimuksen perusideana oli yhdistää aurinkopaneelijärjestelmä led-valaistukseen. Tämä toteutettiin pienjännitteisenä, eli aurinkopaneelien tuottama 24 voltin tasasähkö syötettiin suoraan led-valaisimille ilman jännitetason tai jännitemuodon muutoksia. Toteutuksen etuna on, että tällöin häviöt jäävät teoriassa pienemmäksi kuin yleisemmin käytössä olevassa mallissa, jossa paneelien tuottama sähkö vaihtosuunnataan ja jännite nostetaan Suomen sähköjakeluverkossa käytettävään 230 volttiin, jonka jälkeen se syötetään valaistuksen ja muiden sähkölaitteiden käyttöön.

Haittapuolena tässä oli, että valmiita pienjänniteverkossa toimivia led-valaisimia oli hankala löytää. Koska olemassa olevissa kohteissa on yleensä valmiina vaihtojänniteverkko, valaisinvalmistajat ovat keskittyneet enimmäkseen rakentamaan valaisimia jotka toimivat suoraan vaihtojänniteverkkoon liitettynä.

Tämän tyyppiset valaisimet sisältävät sisäänrakennettuna elektroniikan, joka tasasuuntaa vaihtosähkön ledien käyttämäksi tasavirraksi ja pitää sen sopivan suuruisena. Useimpia 230 voltin vaihtojänniteverkkoon tarkoitettuja valaisimia on mahdollista käyttää myös tasajänniteverkossa, mutta tällöin DC-jännitteen pitäisi olla lähellä vaihtojänniteverkon nimellisjännitettä, eli esimerkiksi 220 VDC. Pienemmän jännitteen käyttö samojen valaisimien yhteydessä nostaa valaisinten ottamaa virtaa, mikä kuormittaa sähköjohtoja.

Tutkimusprojektin perusideana oli kuitenkin pienjännitteinen tasasähköjärjestelmä ja sähköön tuotto-kulutusketjun pitäminen mahdollisimman yksinkertaisena. Koska sekä ledit että aurinkopaneelit toimivat tasajännitteellä, parhaaseen hyötysuhteeseen oletettiin päästävän kun ei muunnettu jännitetasoa tai jännitteen muotoa alkuperäisestä. Tämän vuoksi lopulta päädyttiin rakentamaan tarvittavat valaisimet itse TKK:n valaistusyksikössä. LED-valaisinten rakentamisesta vastasi tutkija Martti Paakkinen.

Valaisimet pohjautuivat Idmanin Triola-valaisimeen, josta poistettiin sen alkuperäisenä valonlähteenä olleet 28 W -loisteputket ja näiden tilalle asennettiin 3 W ledeistä koostuva ledinauha. Kummassakin valaisimessa oli 11 kappaletta Citizen CL-L102-C3N-B lediä ja ledeille virtaa syöttämässä oli kummassakin valaisimessa 6 kappaletta Innoline RCD-24-0.35 liitäntälaitetta.

Kukin liitäntälaitteista syötti siis 1-2 ledille virtaa. Liitäntälaitteiden yhteyteen asennettiin myös himmennysmahdollisuus, jolla pyrittiin pienentämään osaltaan virrankulutusta.

Kuvassa 6.2 on Idmanin alkuperäinen ylempänä ja sen alla samanlainen valaisin ledien asennuksen jälkeen.



Kuva 6.2 Idman Triola-valaisin TL5-loistelampulla (ylempi) ja LED-nauhalla (alempi)

Sähkötehon tuottaminen tehtiin Naps Systemsin NR100G24 aurinkopaneeleilla. Yksittäisen paneelin maksimiteho oli 100 W, jolloin sen toimintajännite oli 33,3 V ja ulostuleva virta 3,0 A. Nimellisjännite oli 24 V, eli sama mikä käytetyillä valaisimilla. Laitteistossa oli kolme samanlaista aurinkopaneelia kytkettynä rinnan, joten koko järjestelmän jännite oli sama kuin yksittäisen paneelin jännite, mutta virta kolminkertainen yhden paneelin ulostulovirtaan nähden. Tällöin paneelien kokonaistehoksi tuli ideaalisissa olosuhteissa 300 W. Yhden paneelin pinta ala oli  $0,72 \text{ m}^2$  ja yhteensä paneeleille tuli siis pinta-alaa  $2,16 \text{ m}^2$ .



Kuva 6.3 Naps NR100G24 aurinkopaneelit asennettuna mittaushaikalalle

Paneelit kytkettiin Naps Systemsin lyijyakkuihin, jotta järjestelmä pysyisi toiminnassa myös silloin kun aurinko ei paista. Yhden akun varauskapasiteetti oli 210 Ah ja jännite 6 V. Koska haluttiin rakentaa 24 V -järjestelmä, kytkettiin neljä samanlaista akkua sarjaan, jolloin varauskapasiteetti oli sama kuin yhdellä akulla, mutta jännite nousi halutulle tasolle. Akut asennettiin valokuution ulkopuolelle erilliseen muoviseen kannelliseen laatikkoon.



Kuva 6.4 Aurinkosähköjärjestelmän akusto

Akkujen varaamista ohjasi Naps Systemsin lataussäädin NC-30N. Lataussäätimen tehtävänä oli varmistaa että akut eivät pääse ylilatautumaan ja toisaalta valvoa ettei niiden varaustaso pääse laskemaan liian alas. Molemmat tilanteet ovat akuille haitallisia ja voivat laskea niiden elinikää. Jos akut ovat täynnä, kytkee lataussäädin aurinkopaneelit irti järjestelmästä ja jos niiden varaustaso laskee liian alas, kytkee säädin järjestelmään kytketyt kulutuslaitteet irti. Järjestelmän lataussäädin on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5 Aurinkosähköjärjestelmän lataussäädin Naps NC-30N

Sähkönkulutusmittauksia varten valaistusjärjestelmään asennettiin lisäksi aikakytketty rele, joka kytki valaistuksen päälle arkipäivisin klo 8-16 väliseksi ajaksi. Muuna aikana valaistus oli siis pois päältä. Tällä pyrittiin simuloimaan toimistohuoneen normaalia käyttöä. Nykyisin toimistojen käyttötunteja tulee usein viikossa huomattavasti enemmän, mutta tämänkertaisia mittauksia varten arvioitiin tämä sopivaksi ajaksi. Valaistuksen lisäksi järjestelmään ei kytketty muita kulutuslaitteita.

Auringon säteilyn mittausta varten asennettiin 5 kappaletta Naps Systemsin 13009 paneeleita, joiden kunkin teho oli 13 W. Näitä ei kytketty muuhun järjestelmään, eli ne eivät tuottaneet lisäsähköä kulutuslaitteiden tarpeisiin. Sen sijaan kuhunkin niistä kytkettiin kuormaksi 470 mΩ vastus, jonka yli olevaa jännitettä mitattiin. Vastuksen valintaperusteena oli että tällöin saatiin paneelien napajännite sopivalle tasolle mittauksia ajatellen.

Kuvassa 6.6 on pohjoisen puolelle asennettu mittauspaneeli. Muihin ilmansuuntiin asennetut paneelit olivat identtisiä tämän teknisesti.



Kuva 6.6 Järjestelmässä käytetty mittauspaneeli Naps 13009

Auringon säteilyintensiteettiä mitattiin Kipp & Zonen SP Lite2-pyranometrin avulla. Pyranometri mittaa auringon kokonaissäteilyä tietyllä aallonpituuskaistalla, jolloin sen yli oleva jännite muuttuu säteilyintensiteetin mukaan lineaarisesti. Aurinkopaneelit toimivat vastaavalla periaatteella, joten kalibroidun pyranometrin avulla viittä mittauspaneelia voitiin käyttää suoraan säteilymittareina, kun niiden yli mitatun jännitteen arvoja verrattiin pyranometrin arvoihin. Kuvassa 6.7 on esitetty mittauksissa käytetty pyranometri.



Kuva 6.7 Kipp & Zonen SP Lite 2 - pyranometri

Mittauksiin käytettiin Daqbook 112-dataloggeria, joka oli kytketty Dellin valmistamaan kannettavaan tietokoneeseen. Daqbookiin kytkettiin jännitteen- ja lämpötilanmittauskortit. Jännitettä mitattiin kaikista viidestä mittauspaneelistä, akusta ja pyranometristä. Mitatut arvot tallennettiin tietokoneelle DasyLab 9.0 mittausohjelmiston avulla. Kuvassa 6.8 on mittauksissa käytetty dataloggeri.



## Kuva 6.8 Daqbook 112 - dataloggeri

Lämpötilan mittaus perustui termoparilankoihin. Termoparin tuottamat jännitteet ovat hyvin pieniä, joten pitkät mittauslangat ovat erittäin alttiita ulkoisille häiriöille. Käytännön syistä mittauksissa vaadittavista langoista tuli niin pitkiä, että mittaukset muuttuivat epäluotettaviksi käytetyllä laitteistolla. Tämän takia luovuttiin lopulta ideasta mitata aurinkopaneelien lämpötilaa. Joka tapauksessa mittausajankohtana ulkona oli suurimman osan ajasta pakkasta, tai lämpötila oli lähellä nollaa, joten lämpötilan heikentävää vaikutusta paneelien tuottoon ei pidetty merkittävänä.

Tarkemmat tekniset tiedot käytetystä laitteistosta löytyvät liitteestä 7.



### 6.1.3 Demonstraation kustannukset

Toteutetut mittaukset olivat osa Tekesin rahoittamaa SolarLED-hanketta. Suurin osa mittauslaitteistosta löytyi ennestään Teknillisen Korkeakoulun valaistusyksiköltä, joten mittauslaitteiston hankinnasta ei aiheutunut suoria lisäkuluja, muuten kuin pyranometrin hankinnan osalta. Seuraavassa on eritelty demonstraation materiaalikustannuksia:

**Valaisimet:** 2 kpl Idman (Philips) Triola (28 W loistelampuilla):  
Valaisimet löytyivät varastosta, uusien vastaavien alaspäin suunnattujen 1 x TL5 loistelampulla varustettujen hinta n. 50€  
kappale -> yhteensä = 100 €

**LED-driverit:** 12 kpl Innoline RCD-24-0.35  
Kappalehintaa = 10,85 €  
Yhteensä = 130,2 €

**Ledit:** 22 kpl Citizen CL-L102-C3N-B.  
Kappalehintaa = 10,54 €  
Yhteensä = 231,88 €

**YHTEISHINTA SEURAAVILLE = 3890 €**

<b>Aurinkopaneelit:</b>	3kpl Naps Systems NR100G24
<b>Mittauspaneelit:</b>	5 kpl Naps Systems 13009
<b>Lataussäädin:</b>	Naps Systems NC-30N
<b>Kaapelit paneelien ja lataussäätimen + lataussäätimen ja akkujen välille</b>	
<b>Akkukaapelit</b>	
<b>Asennustelineet isoille paneeleille</b>	

**Akkulaatikko:** Bauhausista ostettu ulkokäyttöön tarkoitettu muovinen säilytyslaatikko.  
= 30 €

**Pyranometri:** Kipp & Zonen SP Lite 2  
= 382 €

**Asennustarvikkeita:** Nippusiteitä, ruuveja, ohutta johtoa valaisimille, pienten paneelien asennuskiskot. Näitä ei ole huomioitu laskelmassa, arvo n. muutamia kymmeniä euroja.

**YHTEENSÄ:** = 4734,08 € (ilman asennustarvikkeiden hintoja)

Mittauslaitteisto löytyi ennestään pyranometriä lukuun ottamatta valaistusyksiköltä, joten sille ei tässä laskettu erikseen hintaa.

## 6.2 Aurinkopaneelien mittaukset

Sekä aurinkopaneelien tuottamaan sähkötehon, että auringon säteilyintensiteetin mittaus pohjautui mittauksia varten hankittuihin pieniin aurinkopaneeleihin.

Mittauspaneeleina käytettiin viittä Naps Systemsin 13009 aurinkopaneelia, joiden pinta-ala oli  $0,09 \text{ m}^2$ . Näistä neljä asennettiin kuhunkin pääilmansuuntaan  $90^\circ$  kallistuskulmaan, eli pystysuoraan. Viides asennettiin kohti etelää ja sen kallistuskulmaa muutettiin mittausten eri vaiheissa. Mittauspaneelien kuvat on esitetty alla ja niiden sijainti mittauspaikalla kuvassa 6.1.

Ideaalisessa tilanteessa mittauspaneelit olisivat olleet samassa paikassa, mutta mittausalueen ympäristössä olevien rakenteiden takia mittauspaneeleita jouduttiin sijoittamaan hieman eri puolelle kattoa, jotta välttyttiin varjostuksen tuomilta vaikutuksilta tuloksiin.



a) Etelä



b) Länsi



c) Pohjoinen



d) Itä



e) Etelä, kallistettu

Kuva 6.9 Mittauspaneelit

Mittauspaneeleihin kytkettiin kuormaksi  $470 \text{ m}\Omega$  vastus, jonka yli olevaa jännitettä mitattiin tietokoneeseen kytketyllä DaqBook 112 dataloggerilla. Käytännössä siis mitattiin mittauspaneeleihin kytketyn kuorman yli olevaa jännitettä, joka nousee lineaarisesti auringon säteilyintensiteetin kasvaessa. Laitteisto otti yhden näytteen kunkin mittauspaneelin jännitteen arvosta kerran sekunnissa. Tämän jälkeen ohjelmisto

keskiarvoisti minuutin ajalta mitattuja arvoja mahdollisten häiriöiden vähentämiseksi ja tallensi tämän jälkeen minuutin keskiarvon kustakin mittauskanavasta tietokoneelle. Tallennuksen jälkeen mitattujen jännitearvojen perusteella laskettiin auringon säteilyintensiteetti ja aurinkopaneelien tuottama teho, niistä suunnista mihin mittauspaneelit oli kohdistettu.

### 6.2.1 Sähkötehon mitta

Sähkötehon mitta

Aurinkopaneelien napajännite pysyi käytännössä vakiona rinnalle kytketyn akuston vuoksi ja antovirta muuttui auringon säteilyintensiteetin mukaan. Aurinkopaneelien tuottama sähköteho noudatti tällöin sähkötehon perusyhtälöä 6.1:

$$P=UI \tag{6.1}$$

jossa:

$P$  = aurinkopaneelien teho [W]  
 $U$  = aurinkopaneelien napajännite [V]  
 $I$  = aurinkopaneelien antovirta [I]

Vertailun perusteella voitiin todeta, että mittauspaneeliin kytketyn vastuksen yli oleva jännite muuttui lineaarisesti suhteessa aurinkopaneelien ulostulovirtaan, yhtälön 6.2 mukaan:

$$k=\frac{u_{mp}}{I} \tag{6.2}$$

jossa:

$k$  = vakio  
 $u_{mp}$  = mittauspaneelien vastuksen yli oleva jännite [V]  
 $I$  = aurinkopaneelien mitattu antovirta [A]

Yhtälön 6.2 perusteella voidaan johtaa yhtälö aurinkopaneelien antovirralle  $I$ :

$$I=\frac{u_{mp}}{k} \tag{6.3}$$

Kun antovirran yhtälö 6.3 sijoitetaan aurinkopaneelien tuottaman sähkötehon yhtälöön 6.1, saadaan aurinkopaneelien tuottama teho laskettua mittauspaneeleista ja akun navoista mitattujen jännitteiden perusteella yhtälön 6.4 mukaisesti:

$$P=VI=V\cdot\frac{u_{mp}}{k} \tag{6.4}$$

Koska mittauspaneelien jännitteen ja aurinkopaneelien antovirran välinen

verrannollisuuskertoimen  $k$  todettiin vakioksi kokeellisesti, tämän yhtälön perusteella saatiin määritettyä aurinkopaneelien tuottama sähköteho virtuaalisesti kaikista niistä suunnista joihin mittauspaneelit oli suunnattu, hyödyntämällä eri mittauspaneelien jännitteitä ja sijoittamalla ne yhtälöön 6.4.

### 6.2.2 Auringon säteilyn mittaus

Auringon säteilyä mitattiin ensin kalibroidulla pyranometrillä, joka mittasi suoraan auringon säteilyintensiteetin aallonpituuskaistalla 400-1100 nm. Kun katsotaan kuvaa 2.3, nähdään että tämä soveltuu hyvin aurinkopaneelien hyödyntämän säteilykaistan mittaukseen. Pyranometrin antojännite riippuu auringon säteilytasosta. Käytössä olleen Kipp & Zonen SP Lite2-pyranometrin jännite muuttui yhtälön 6.5 mukaisesti:

$$E_s = \frac{U_p}{S_p} \quad (6.5)$$

jossa:

$E_s$  = Auringon säteilyintensiteetti [ $\text{W/m}^2$ ]

$U_p$  = Pyranometrin antojännite

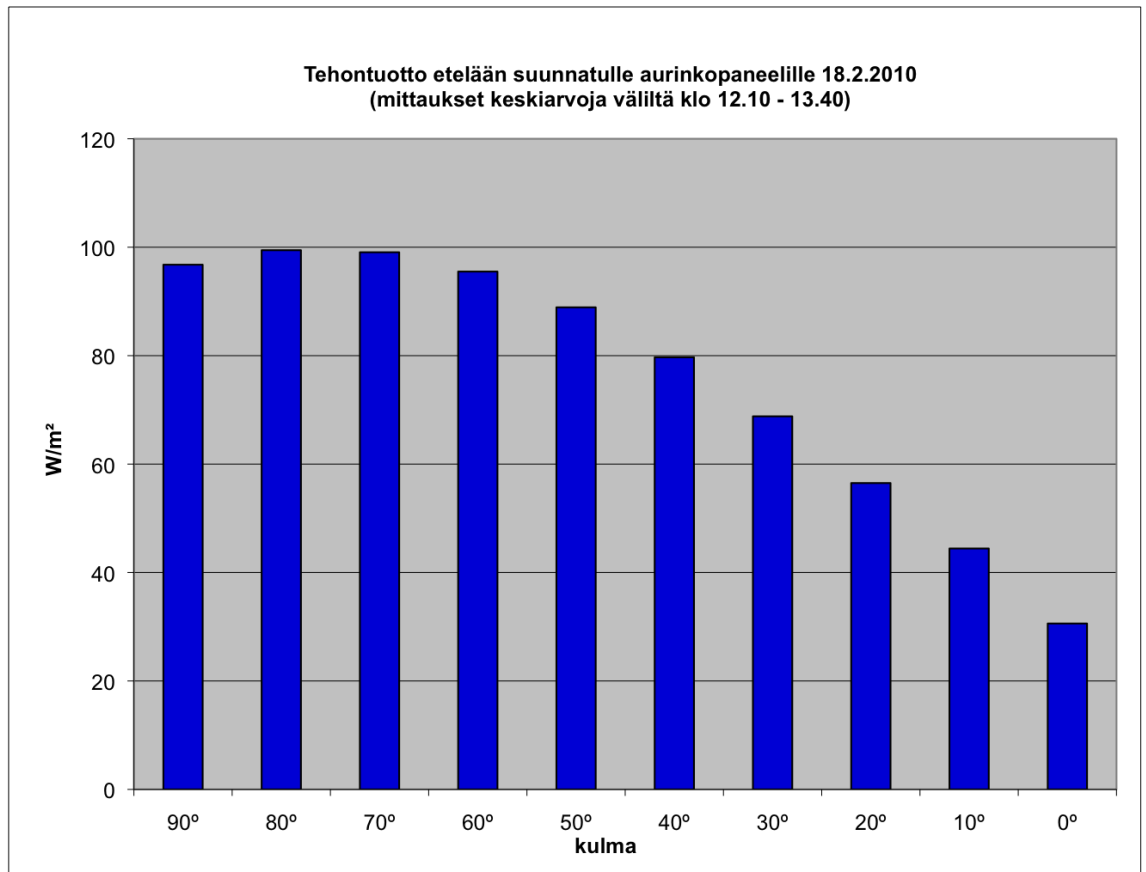
$S_p$  = Pyranometrin herkkyys, tässä tapauksessa vakio =  $73,8 \mu\text{V/W}$

Koska pyranometri oli asennettu samaan telineeseen etelään päin asennetun, säädettävällä kallistuskulmalla varustetun mittauspaneelin kanssa, saatiin tämän suunnan säteilyintensiteetti mitattua suoraan. Muut ilmansuunnat saatiin mitattua, kun verrattiin niihin kohdistettujen mittauspaneelien jännitettä pyranometrin kanssa samaan suuntaan kohdistetun paneelin jännitteeseen. Nämä toimivat tällöin siis eräänlaisina ”virtuaalisina pyranometreinä”.

Käytännössä mittaukset toteutettiin samaan aikaan aurinkopaneelien sähkötehon mittauksien kanssa. Pyranometri ja mittauspaneelit kytkettiin DaqBook-dataloggerin jännitemittauskanaviin ja arvot tallennettiin DasyLab 9.0-mittausohjelmistolla. Tämän jälkeen säteilyintensiteetit laskettiin mitatuista arvoista käyttämällä Microsoft Exceliä.

### 6.2.3 Asennuskulman vaikutus tuloksiin

Mittausajankohta lokakuun loppu 2009 – helmikuun alku 2010 ei ollut paras mahdollinen aurinkopaneelien tuotannon kannalta, mutta tulokset osoittivat ainakin sen, että aurinkosähkö ei ole Suomen olosuhteissa toimiva ratkaisu ympärivuotiseen sähköntuotantoon. Koska mittauspaneeleita oli käytössä rajallisesti ja neljä niistä oli asennettu kiinteästi  $90^\circ$  kallistuskulmaan päällmansuuntiin, ei jokaisesta mahdollisesta kulmasta voitu mitata tuottoa jatkuvasti. Tämän vuoksi päädyttiin siihen, että ensimmäiset kolme kuukautta mitattiin aurinkopaneelien sähköntuotantoa jatkuvasti siinä kulmassa, mihin järjestelmän pääpaneelit oli oikeasti asennettu. Tämän jälkeen toteutettiin pistemäisiä mittauksia helmikuun puolivälissä muuttamalla etelään suunnatun säädettävän paneelin kallistuskulmaa  $10^\circ$  välein. Tällä tavoin saatiin käsitys siitä, millaisessa kallistuskulmassa talvisin saadaan aurinkopaneelilla tuotettua parhaiten sähköä ja miten paljon se eroaa talon seinälle tai muuhun vastaavaan paikkaan pystysuoraan asennetun paneelin tuotannosta. Aurinkopaneelin kallistuskulman vaikutus sähköntuotannon tehokkuuteen on esitetty kuvassa 6.10.



Kuva 6.10 Aurinkopaneelin kallistuskulman muutoksen vaikutus tuottoon (18.2.2010)

Mittausten perusteella optimikulma on n. 80°, ehkä hieman alle, silloin kun aurinko on korkeimmillaan.

Jos verrataan tulosta NASAn laskemaan helmikuun päivätuoton mukaan optimoituun kulmaan 67° (liite 3.), voidaan tulosta pitää melko hyvänä.

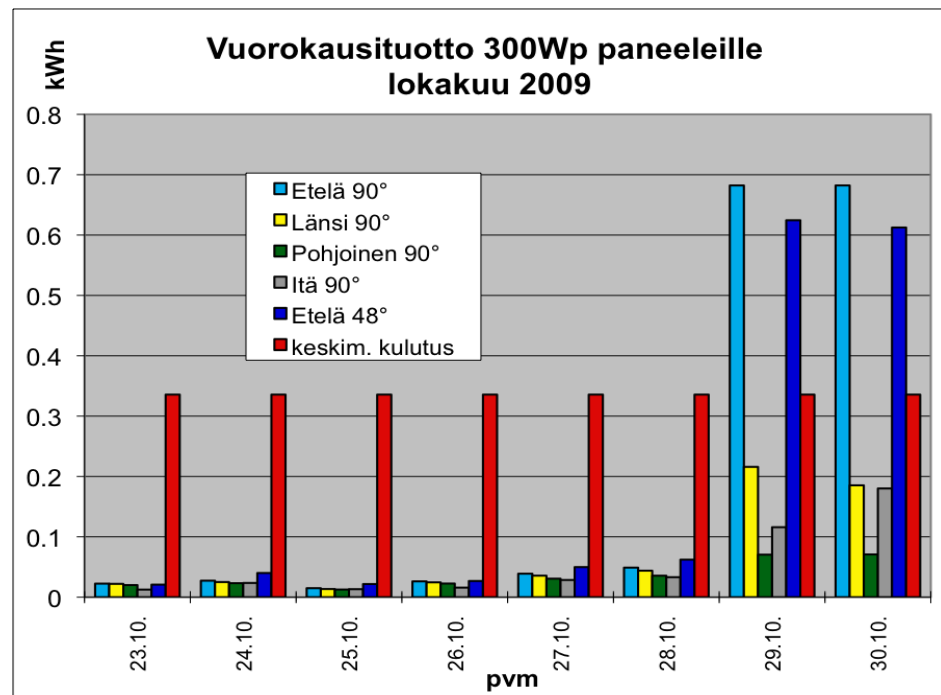
Mittausajankohtana oli aurinkoinen päivä helmikuun puolivälissä, kellonaikaan jolloin säteilyä tuli eniten. Keskimääräiset tuotot jäävät tästä selvästi, kuten selviää seuraavassa luvussa.

#### 6.2.4 Sähköntuotannon tehokkuus ajan funktiona

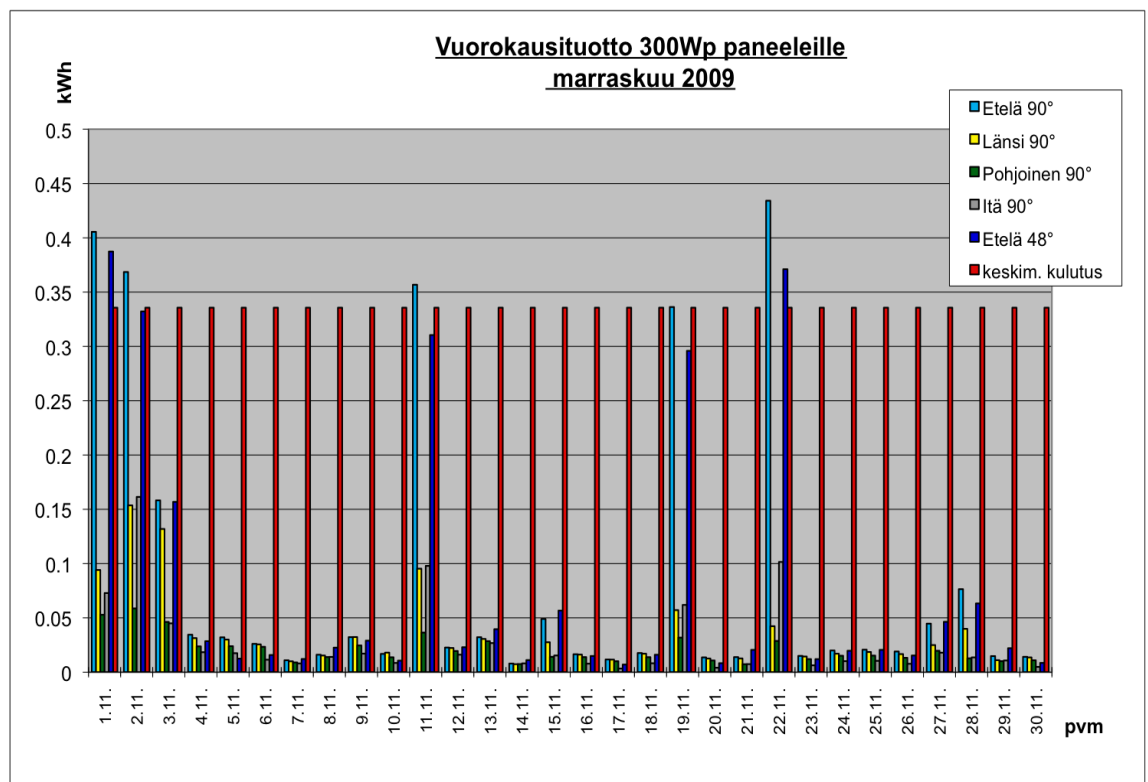
Koska mittauksen ajankohta ajoittui loppusyksyyn ja talvelle, jäivät tulokset kauas siitä mitä vastaavilla paneeleilla voitaisiin saavuttaa paremmissa säteilyolosuhteissa. Sääolot ja pilvisuus vaihtelevat vuosittain, mutta keskimäärin tähän aikaan vuodesta on melko vähän aurinkoisia päiviä ja valoisan ajan kesto jää joka tapauksessa lyhyeksi. Alla on esitetty kuvissa 6.11-6.14 järjestelmässä käytetyn 300 W<sub>p</sub>-paneeliston sähköntuotanto watteina ja ampeeritunteina aikavälillä lokakuu 2009- tammikuu 2010.

Tulokset on määritetty siis eri ilmansuuntiin ja kallistuskulmiin asennettujen mittauspaneelien perusteella, ei suoraan pääpaneeleista mittaamalla. Koska mittauspaneelit olivat keskenään identtisiä ja pääpaneeleiden tuotto oli mitoitettu luvussa 6.2.1 kuvatulla tavalla mittauspaneelien tuottoon, ovat tulokset perusteltavissa. Sähkönkulutuksen pohjana ovat hetkelliset kulutusmittaukset. Näitä mittauksia toteutettiin erilaisilla akuston varaustasoilla ja ajanhetkillä. Hetkellisten kulutusmittauksen tuloksissa ei havaittu suuria eroja, joten tuloksista otettiin keskiarvo, jota käytettiin tämän jälkeen mittauksissa päivittäisen kulutuksen arvona. Kulutuksen

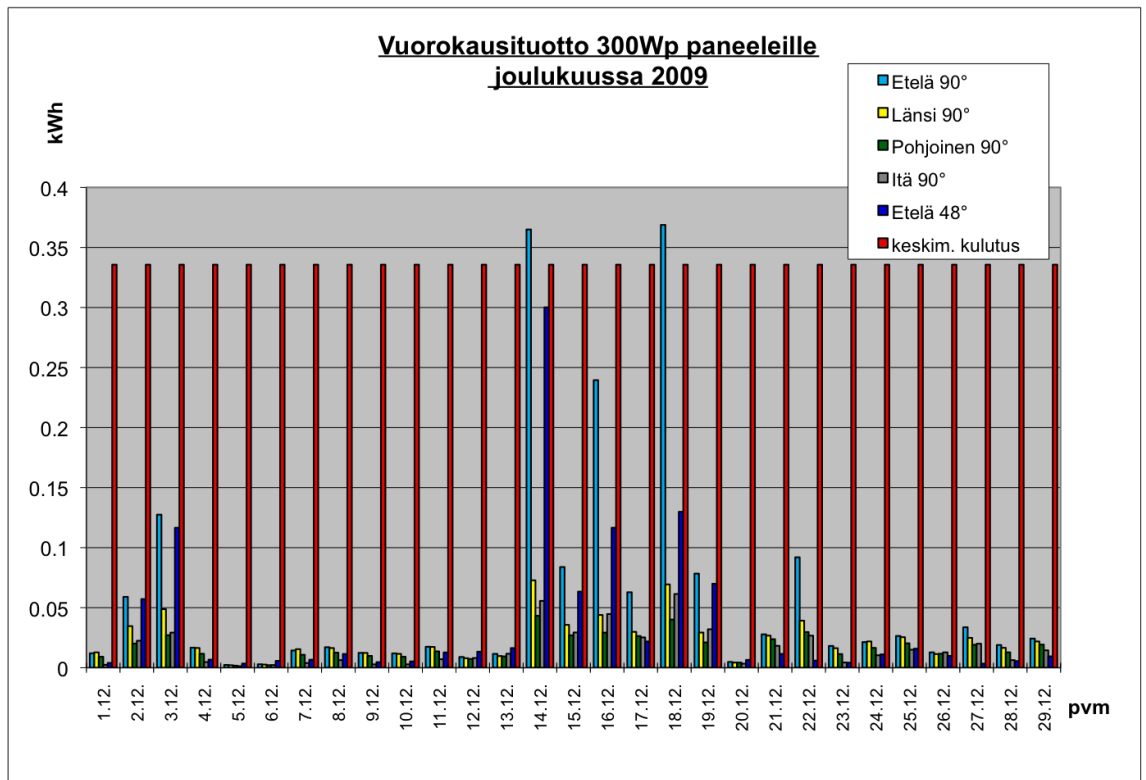
jatkuva mittaus ei ollut mahdollista käytössä olleella mittauslaitteistolla, sillä järjestelmässä kulkevat virrat olivat liian suuria mittauslaitteistolle.



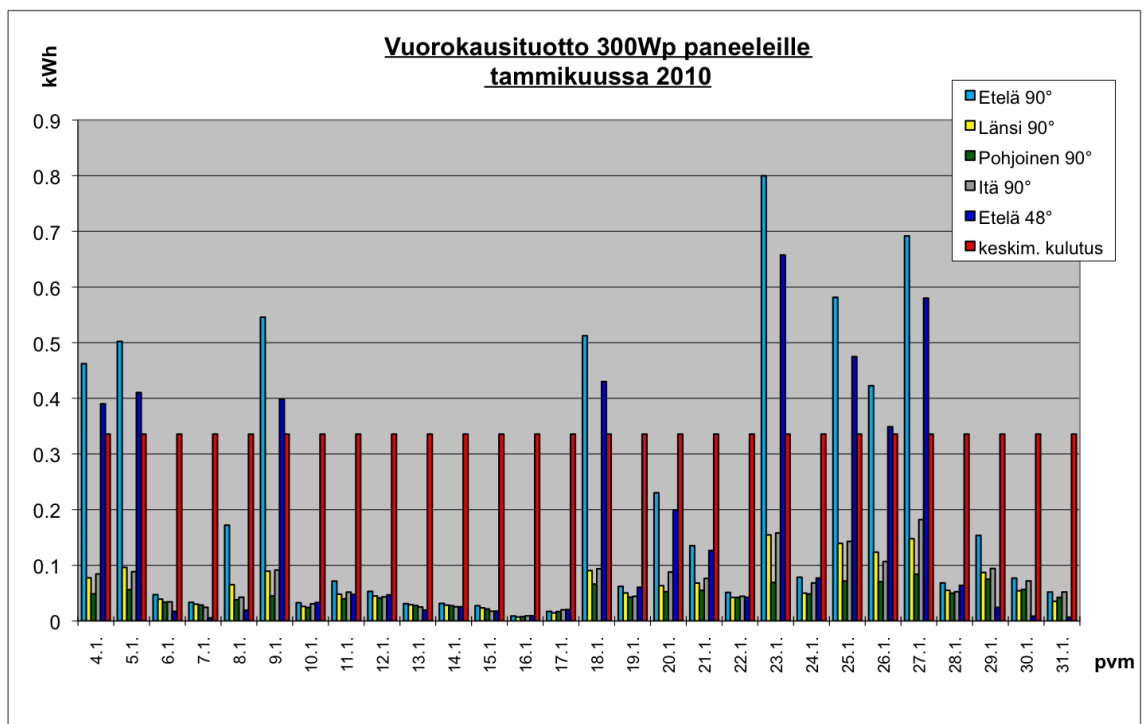
Kuva 6.11 Paneelien keskimääräinen päivätuotto [kWh] lokakuussa 2009



Kuva 6.12 Paneelien keskimääräinen päivätuotto [kWh] marraskuussa 2009



Kuva 6.13 Paneelien keskimääräinen päivätuotto [kWh] joulukuussa 2009



Kuva 6.14 Paneelien keskimääräinen päivätuotto [kWh] tammikuussa 2010

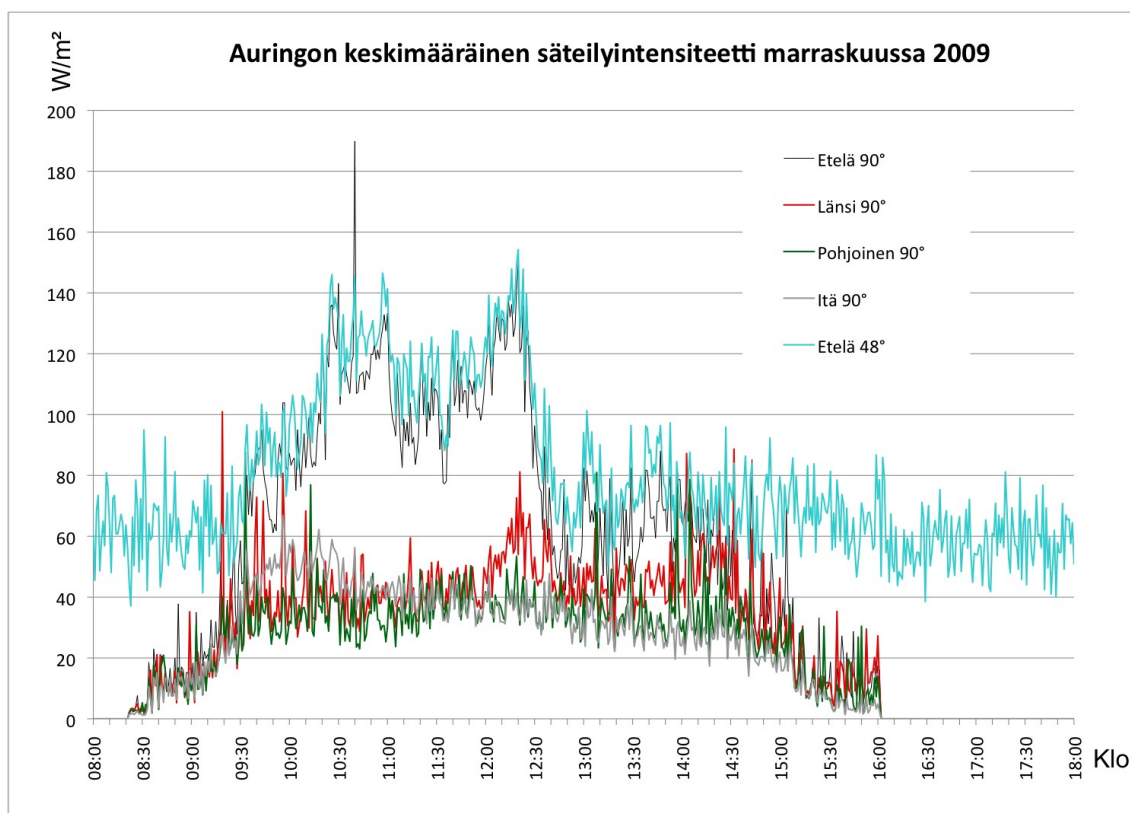
Kuvia 6.11-6.14 tarkasteltaessa huomataan että talvella paneelien sijoitus pystysuoraan on vuosittaista optimikulmaa (48°) parempi vaihtoehto tuotannon kannalta, sitä selvemmin mitä lähempänä ollaan talvipäivän seisausta, eli vuoden pimeintä aikaa. Auringon säteily on kuitenkin talviaikaan niin heikkoa, että tuotanto jää

joka tapauksessa pieneksi. Suurimpana osana mittausajan päiviä 300 W huipputeholle mitoitettu aurinkosähköjärjestelmä ei riittänyt edes n. 40 W tehoisen valaistuksen kuluttaman sähkön tuottamiseen. Tällöin jouduttiin turvautumaan akkuihin ladattuun sähköön ja pimeimpään aikaan akkuja jouduttiin välillä myös lataamaan sähköverkosta erillisellä laturilla. Esimerkiksi joulukuussa valoisia päiviä oli vain kolme, joten kuukauden tuotettu sähkömäärä jäi hyvin pieneksi.

### 6.2.5 Auringon säteilyintensiteetin mittaustulokset

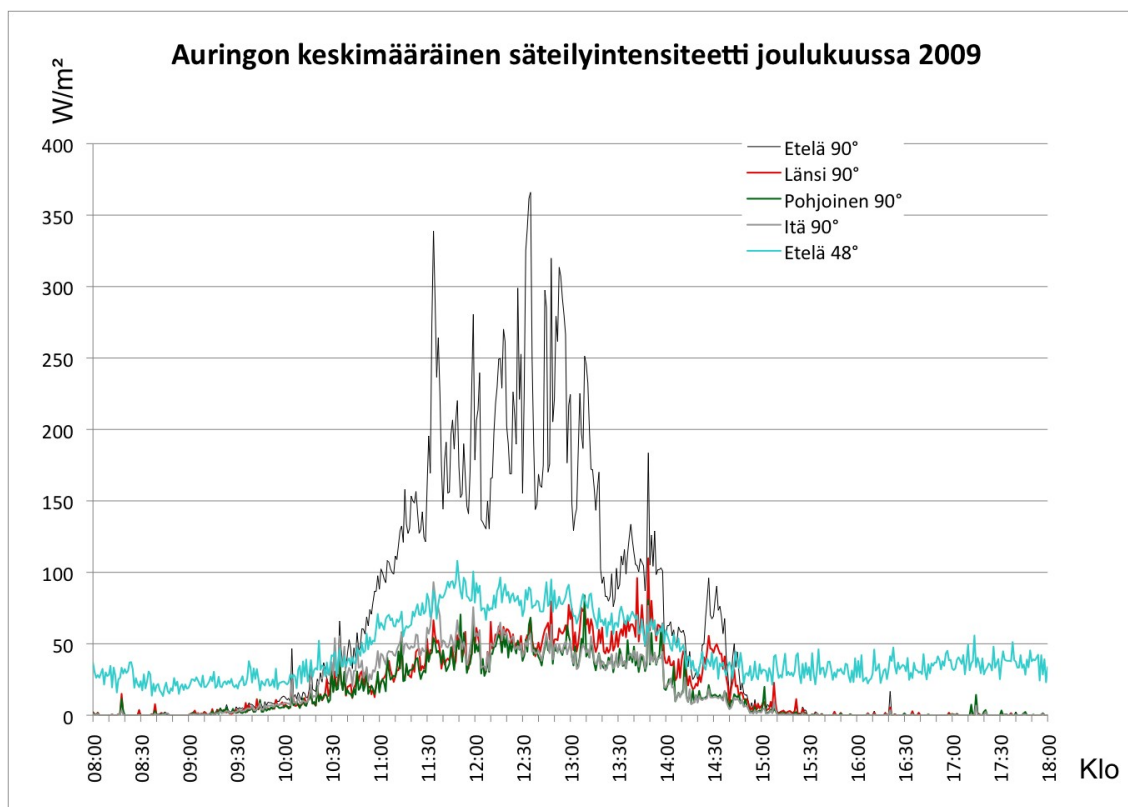
Mittausaikana valoisia päiviä oli melko vähän, joten myös mittauskuukausien keskimääräiset säteilymäärät jäivät pieniksi. Mittauksissa käytetyn pyranometrin toimitusaika venähti sen verran, että mittaukset päästiin aloittamaan vasta marraskuun puolivälissä. Kuvissa 6.15-6.17 on esitetty aikavälin marraskuu 2009-tammikuu 2010 mitatut säteilyintensiteetit.

Kuvia tarkasteltaessa on huomioitava, että mittauspaneelien herkkyys oli pienempi kuin pyranometrin ja tämän takia luvussa 6.2.2 esitetyllä metodilla ei voitu piipohjaisia aurinkokennoja hyväksikäyttäen mitata hyvin alhaisia säteilytasoja. Ajanhetkillä jolloin pyranometrin mittaama säteilyintensiteetti (Etelä 48°) laskee alle tason 50 W/m<sup>2</sup>, ei muiden ilmansuuntien säteilyintensiteettiä voitu mitata riittävällä luotettavuudella. Kuvissa tämä näkyy siten, että muiden suuntien tulokset laskevat lähelle nollaa. Tulokset ovat siis enemmänkin suuntaa antavia, kuin absoluuttisen tarkkoja, etenkin muiden kuin etelä 48-suunnan osalta.

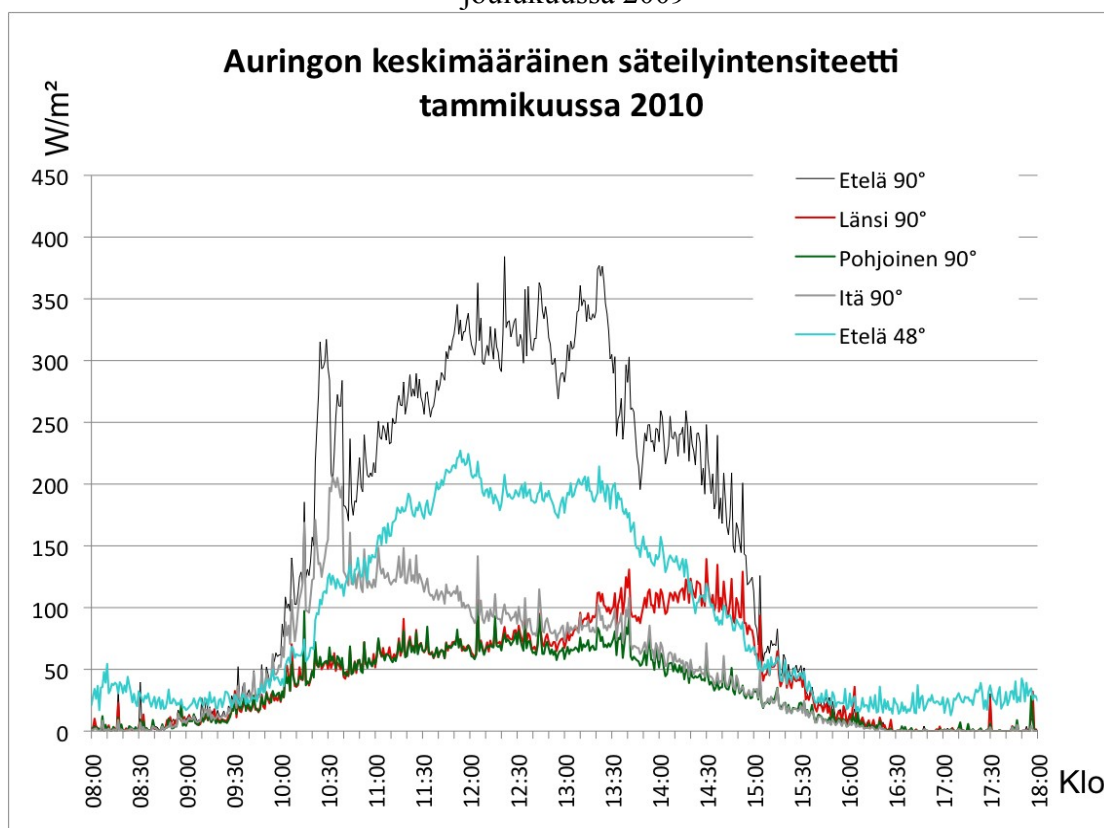


Kuva 6.15 Valoisan ajan keskimääräinen päivittäinen säteilyintensiteetti marraskuussa 2009





Kuva 6.16 Valoisan ajan keskimääräinen päivittäinen säteilyintensiteetti joulukuussa 2009



Kuva 6.17 Valoisan ajan keskimääräinen päivittäinen säteilyintensiteetti tammikuussa 2010

Joulu- ja tammikuun osalta on myös huomioitava, että lumi vaikutti osaltaan

mittaustuloksiin. Välillä lumi peitti paneeleita, jolloin pinnalle kohdistuva säteily jäi todellista pienemmäksi ja toisaalta taas välillä lumi heijasti valoa maan kautta takaisin paneeleihin, jolloin säteilyä tuli niihin todellista enemmän.

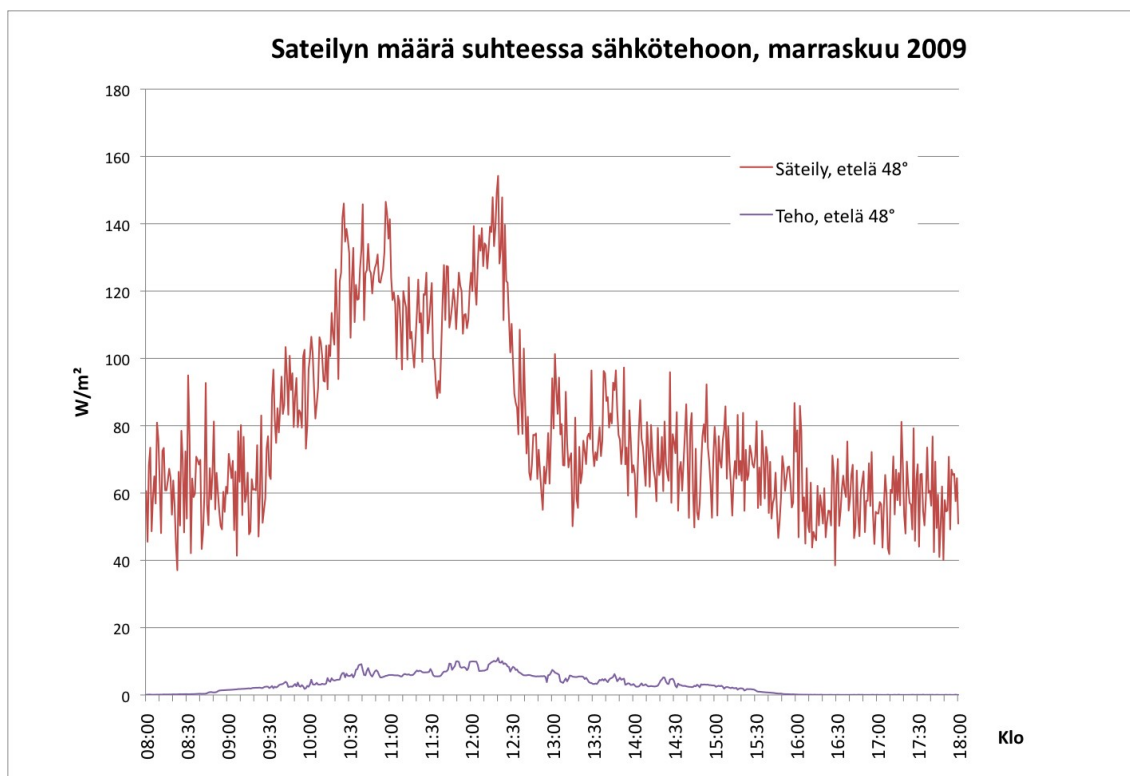
Kaikkein selkeimmin lumen vaikutus näkyy joulukuun tuloksissa: pyranometri oli asennettu  $48^\circ$  kallistuskulmassa olevan paneelin kanssa samaan telineeseen ja muut paneelit olivat pystysuorassa. Lumi kerääntyi siis helpommin kallistetun paneelin pinnalle kuin pystysuorille pinnoille. Pyranometrin rakenteesta johtuen se oli kuitenkin ulompana pinnasta kuin aurinkopaneeli. Tämän vuoksi lumi ei peittänyt kaikissa tapauksissa pyranometriä, vaikka siihen kytketty paneeli olikin lumen alla. Pyranometrin peittyminen olisi estänyt muiden paneelien jännitteiden vertailun pyranometrin kanssa asennetun paneelin jännitteeseen, luvun alussa esitetyn  $50 \text{ W/m}^2$  intensiteettitason rajaehdon takia. Koska pyranometri oli kuitenkin näkyvässä, ei tämä rajoitus toteutunut ja muiden ilmansuuntien säteilyintensiteettiä mitattaessa tuloksista tuli virheellisiä, koska vertailuarvo oli virheellinen lumen vuoksi.

Tämän vuoksi etenkin joulukuussa muiden ilmansuuntien tulokset ovat suhteessa huomattavasti todellista suuremmat ja toisaalta etelään päin  $48^\circ$  kallistetun suunnan tulokset ovat lumen kertymisen vuoksi jonkun verran todellista pienemmät.

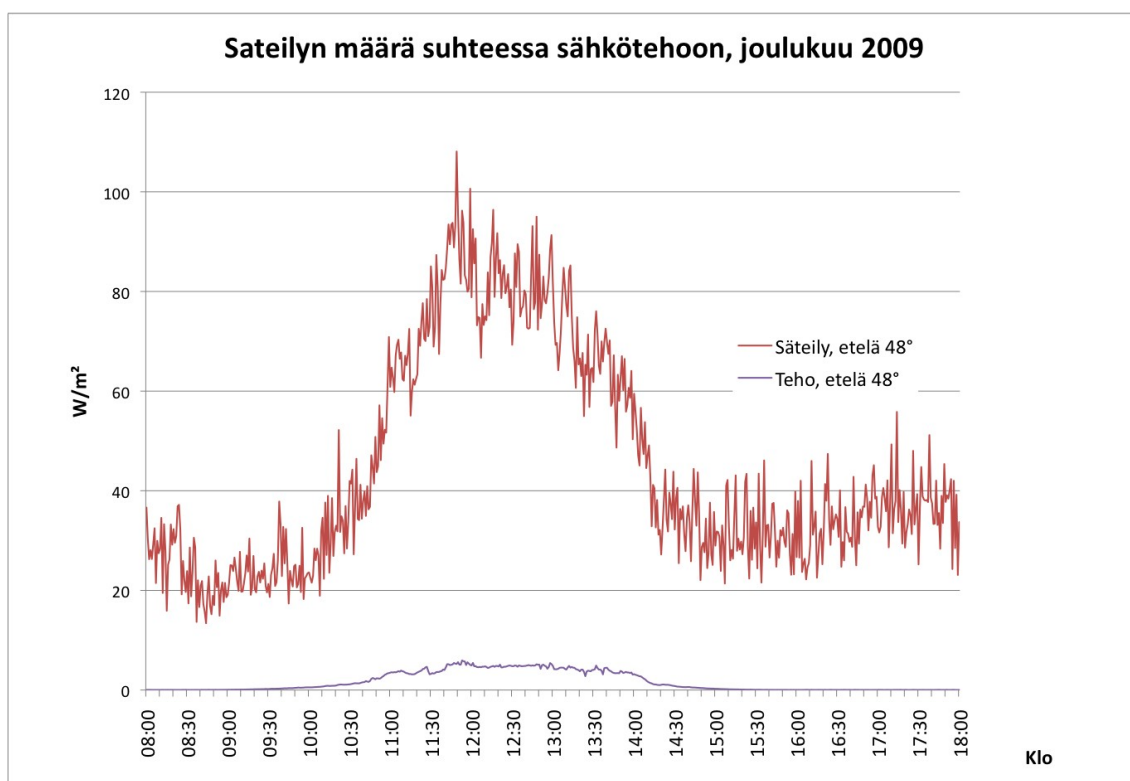
Hetkellisesti mitattiin melko korkeitakin säteilyvoimakkuuksia myös talvella. Luvussa 6.2.3 toteutetussa kallistuskulman vaikutuksen mittauksessa saatiin lähellä optimia olevalla  $80$  asteen kallistuskulmalla hetkellisesti n.  $870 \text{ W/m}^2$  säteilytehoja helmikuun puolessa välissä. Tässä on tosin huomioitava lumen heijastuksesta aiheutunut vaikutus, sillä näin suuressa kallistuskulmassa pyranometriin heijastui myös maan kautta valkoisesta lumesta melko paljon säteilyä.

#### **6.2.6 Paneelien hyötysuhde**

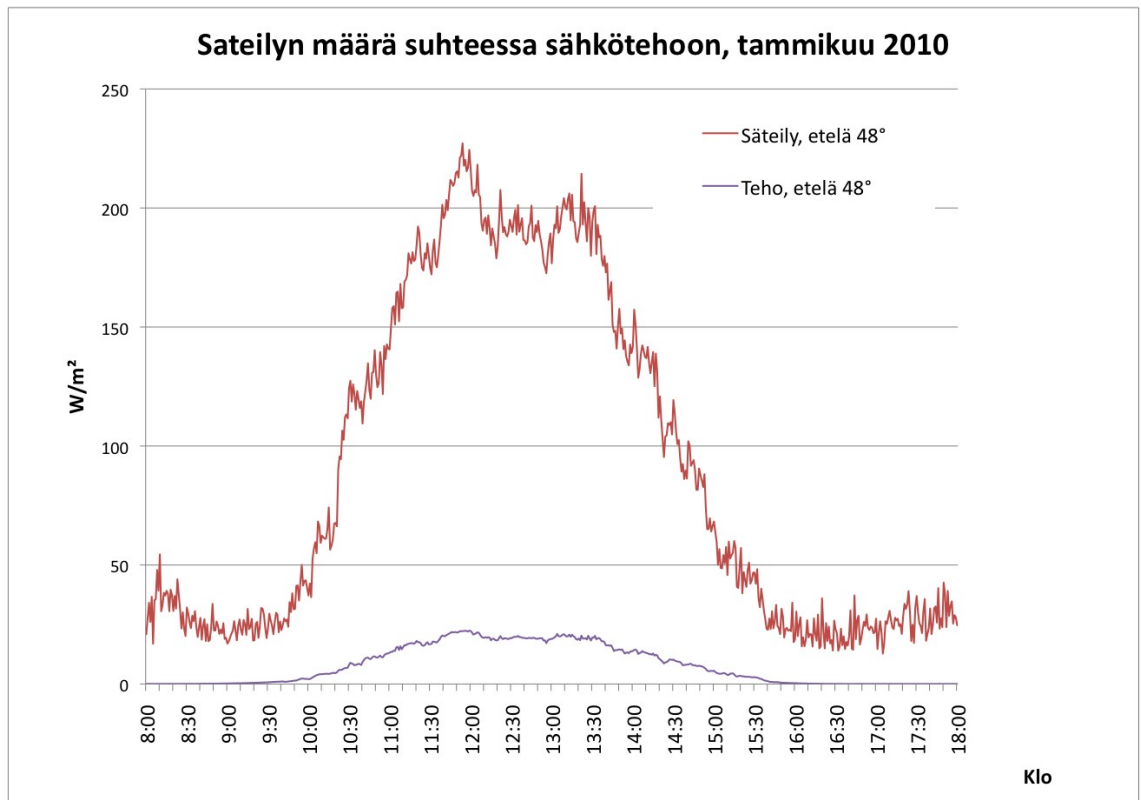
Paneelien hyötysuhdetta arvioitiin vertaamalla sähkötehoja samoilla ajanhetkillä mitattuihin säteilytehoihin. Koska säteilytehon mittausta todettiin epävarmaksi hyödynnettäessä aurinkopaneeleita säteilymittareina, hyötysuhdetta arvioitiin tämän takia vain vertaamalla pyranometrin mittaamia säteilytehon arvoja samaan suuntaan osoittavan paneelin tuottamaan tehoon. Kuvissa 6.18-6.20 on esitetty valoisien ajan säteilyintensiteetit aikavälillä marraskuu 2009-tammikuu 2010 ja saman aikavälin keskimääräiset sähkötehot. Molemmat on ilmoitettu yksikössä  $\text{W/m}^2$ .



Kuva 6.18 Auringon säteilyn määrä suhteessa paneelista saatuun sähkötehoon marraskuussa 2009



Kuva 6.19 Auringon säteilyn määrä suhteessa paneelista saatuun sähkötehoon joulukuussa 2009



Kuva 6.20 Auringon säteilyn määrä suhteessa paneelista saatuun sähkötehoon tammikuussa 2010

Mittaukset osoittivat, että hyötysuhde ei ole vakio, vaan se muuttuu säteilyn määrän mukaan. Mittausajankohdan koko valoisan ajan keskimääräinen hyötysuhde oli tulosten perusteella n. 5 % ja puolenpäivän aikoihin, jolloin säteilyä tuli eniten, hyötysuhde nousi n. 10% tasolle. Näitä ei voida pitää erityisen korkeana, kun yleisesti otettuna yksikide-pii tekniikalla toteutettujen aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat nykyisin n. 15-20% piipohjaisille kennoille. (Duffie, Beckman, 2006)

Mittausten perusteella paneelien hyötysuhde kuitenkin paranee säteilytason noustessa ja tällöin kesäaikaan aurinkopaneeleilla saadaan enemmän sähköä paitsi lisääntyneen säteilyn myötä myös kasvaneen hyötysuhteen ansiosta.

Tässä mittauksessa tuli siis esille konkreettisesti syy, minkä takia on kehitetty MPTT-laitteita (luku 2.2.2). Lyijyakku on yleensä staattista resistanssia parempi kuorma aurinkopaneeleille, mutta sekään ei yleensä ole täysin optimaalinen, etenkin silloin kun akkujen varaustaso on pieni. MPTT-laite siis optimoi kuorman vastaamaan tuotantoa, jolloin päästään parempaan hyötysuhteeseen myös matalilla säteilytasoilla. Tässä projektissa sellaista ei kuitenkaan ollut käytössä.

## 6.3 LED-valaistusratkaisu osana aurinkosähköjärjestelmää

Sekä aurinkopaneelit että ledit toimivat tasajännitteellä. Ledien valotehokkuus on myös jo nykyään korkeampi kuin useimmissa perinteisissä lampuissa ja sen odotetaan paranevan vielä tulevaisuudessa. Tämän vuoksi led-valaistuksen liittäminen osaksi tutkittavaa tasasähköllä toteutettua aurinkosähköjärjestelmää arvioitiin parhaaksi tavaksi tuottaa valoa aurinkosähkön avulla. Tässä kappaleessa perehdytään led-valaistuksen toteutukseen sekä siihen, miten hyvin se toimi koeolosuhteissa.

### 6.3.1 LED-valaistusratkaisun liittäminen aurinkosähköjärjestelmään

Projektin alusta alkaen kantavana ideana oli että sähkö saataisiin siirrettyä mahdollisimman pienillä muunnoksilla aurinkopaneeleilta valaisimille. Tällä pyrittiin vähentämään siirto- ja muuntohäviöitä. Mikäli oltaisiin käytetty normaaleja vaihtojänniteverkkoon suunniteltuja valaisimia, väliin olisi tarvittu invertteri jännitemuunnosta varten ja valaisintyypistä riippuen mahdollisesti myös muuntaja valaisimien yhteyteen.

Koska kaapeleiden pituudet jäivät melko lyhyiksi, noin 10-20 metriä paneeleilta lataussäätimelle ja akustolle, ei myöskään siirtohäviöitä syntynyt mainittavissa määrin. Tasajänniteverkossa näiden osuus on muutenkin erittäin pieni verrattuna muuntohäviöihin, joita syntyy AC/DC-muunnoksessa tai DC-jännitteen tason muuntamisen yhteydessä. Sähkön varastointi akkuihin toi omat häviönsä systeemiin, mutta lataussäädin ohjaa sähkön ensisijaisesti kulutuslaitteille ja mahdollisen ylijäämän akuille. Tällöin siis riittävässä päivänvalotilanteessa sähköä ei kierrätetä akuston kautta, vaan se toimitetaan suoraan kulutuslaitteille. Akusto oli kuitenkin välttämätön, sillä Suomen olosuhteissa ei voida luottaa siihen, että aurinkoa on aina tarjolla silloin kun sähkölle on tarvetta. Tämä korostuu etenkin talviaikaan, jolloin ylipäättään aurinkoenergian käyttö on hankalaa näillä leveysasteilla.

Toteutettu järjestelmä oli seuraavanlainen: aurinkopaneelit (3x100 W) tuottivat sähkön, joka ohjattiin lasikuution sisällä olevalle lataussäätimelle. Lataussäädin puolestaan kontrolloi akustojen latausta ja sähkön syöttöä kulutuslaitteille. Lataussäätimeen kytkettiin 4x210 Ah / 24V akut, sekä 2x 37 W led-valaisimet.

Mittausjärjestelyissä päädyttiin simuloimaan toimistohuoneen olosuhteita. Tämän vuoksi tilan keskellä olevan työpöydän alueella haluttiin saada riittävä valaistusvoimakkuus, joka toimistovalaisuksen suosituksissa on yleensä 500 lx ja sen ympäristöön n. 300 lx. Koska haluttiin simuloida toimistoa, valittiin valaisinten käyttöajaksi päivässä 8 tuntia, eli valaisimet olivat päällä klo. 8-16 ja muuna aikana ne oli kytketty pois. Tämä toteutettiin asentamalla kellokytkimen ohjaama rele valaisinten ja lataussäätimen väliin.

Energiankulutuksen pienentämiseksi led-valaisimiin asennettiin myös himmennysmahdollisuus, jonka avulla tutkittiin miten paljon saadaan käytetyillä valaisimilla säästettyä energiaa ilman että valaistustaso laskee liian alas.

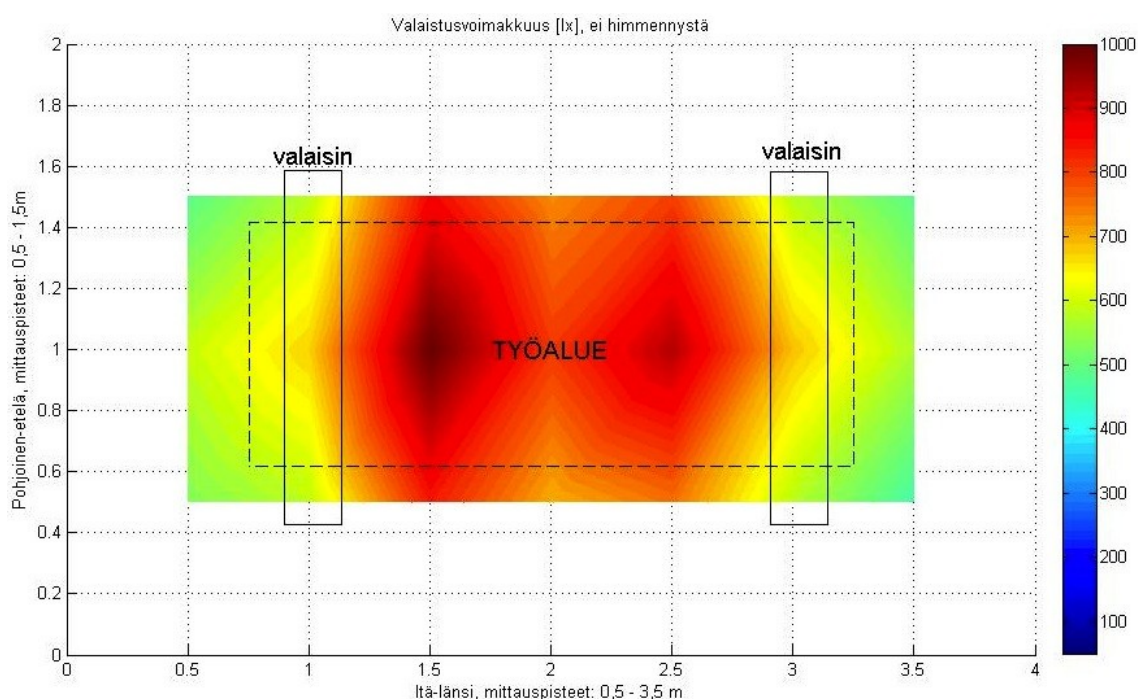
### 6.3.2 Valontuotannon tehokkuus ja vertailu perinteiseen valaistusjärjestelmään

Valaistusvoimakkuudet mitattiin LMT Pocket Lux 2 valaistusvoimakkuusmittarilla.

Työalueella tarkoitetaan tässä yhteydessä mittaustilassa olevan toimistopöydän pintaa, joka on esitetty kuvassa katkoviivalla. Työalueen ulkopuolisella alueella tarkoitetaan tämän alueen välittömässä ympäristössä olevaa aluetta, eli väritettyä aluetta joka on katkoviivoilla esitetyn neliön ulkopuolella. Valaistusvoimakkuudet mitattiin lähimmillään puolen metrin päässä seinistä, joten tämän takia kuvissa 6.21-6.25 reunoilla on valkoiset alueet joihin ei ole merkitty mittaustuloksia.

Mitattavassa toimistotilassa oli 2 kappaletta 120 cm pitkiä kattovalaisimia (kts. kuva 6.1), joihin oli vaihdettu 28 W loistelamppujen tilalle kumpaankin 11 kpl 3 watin ledejä. Ledien ja niitä ohjaavan liitälaitteiston kuluttama sähköteho valaisinta kohden oli 37 W täydellä teholla. Tilan pinta-ala oli n. 8m<sup>2</sup>, joten täydellä teholla valaistusteho/m<sup>2</sup> oli 76/8 = 9,5 W/m<sup>2</sup>. Tällöin saatiin työalueen keskelle hieman alle 1000 lx ja seinän viereen n. 500 lx.

Tarkemmin valon jakautuminen on esitetty kuvassa 6.21, jossa toimistohuoneen pohjapiirroksen on merkitty valon jakautuminen.



Kuva 6.21 Valaistusvoimakkuus valokuutiassa, ei himmennystä

Valon värielämpötila oli n. 4000 K, joten kysymys oli ns. luonnonvalkoisesta valosta.

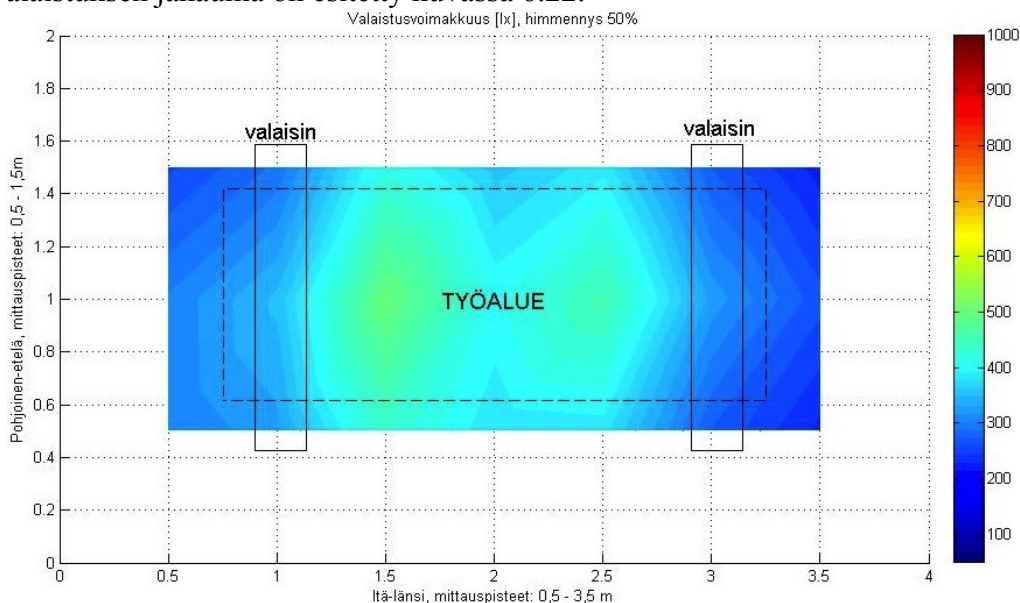
Koska sähkötehontarve pyrittiin minimoimaan, asennettiin valaisimiin myös himmennysmahdollisuus. Himmennys toimi siten, että ledejä ohjaavissa liitälaitteissa oli erillinen portti himmennystä varten, johon tuleva jännite pienensi ledeille syötettyä virtaa. Eli mitä suurempi himmennysjännite, sitä pienemmäksi liitälaitte pienensi ledeille syötettyä sähkövirtaa, jolloin valaisinten kuluttama sähköteho pieneni. Valaisinten jännite pysyi siis vakiona koko ajan, vain virtaa säädeltiin. Himmennysvaihtoehdot ja niihin liittyvät mitatut sähköiset tiedot on esitetty taulukossa 6.1

Taulukko 6.1 Valaisinten himmennysasteet

Käyttöjännite [V]	Himmennysjännite [V]	Himmennysaste %	Valaisimiin menevä virta [A]	valaisinten sähköteho [W]
24.2	7,5	62,5	0.9	21.78
	6	50	1.2	29.04
	4,5	37,5	1.6	38.72
	0	0	3	72.6

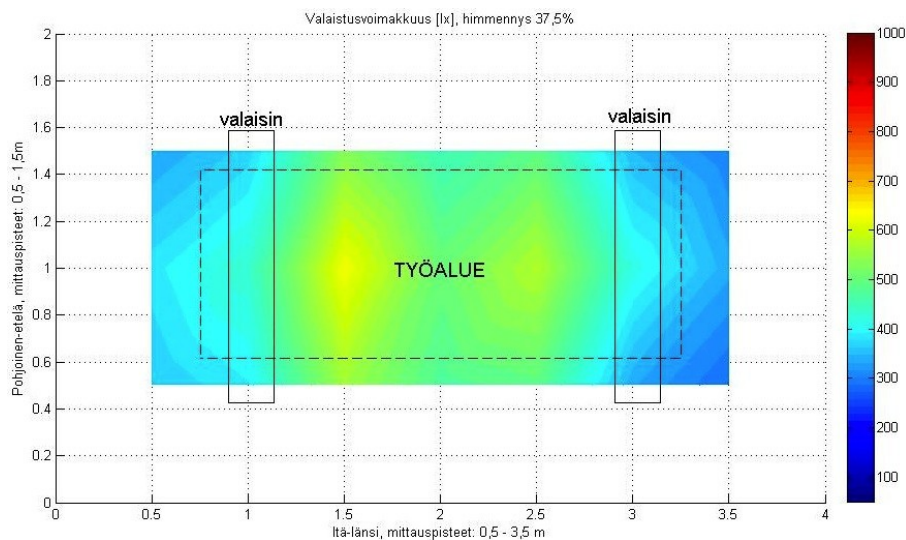


Aluksi himmennys asetettiin 50% tasolle. Tällöin työalueen valaistusvoimakkuus oli riittävän rajamailla, ollen välillä 350-500 lx ja työalueen ulkopuolisen osan n. 250-300 lx. Valaistuksen jakauma on esitetty kuvassa 6.22.



Kuva 6.22 Valaistusvoimakkuus työalueella, himmennys 50%

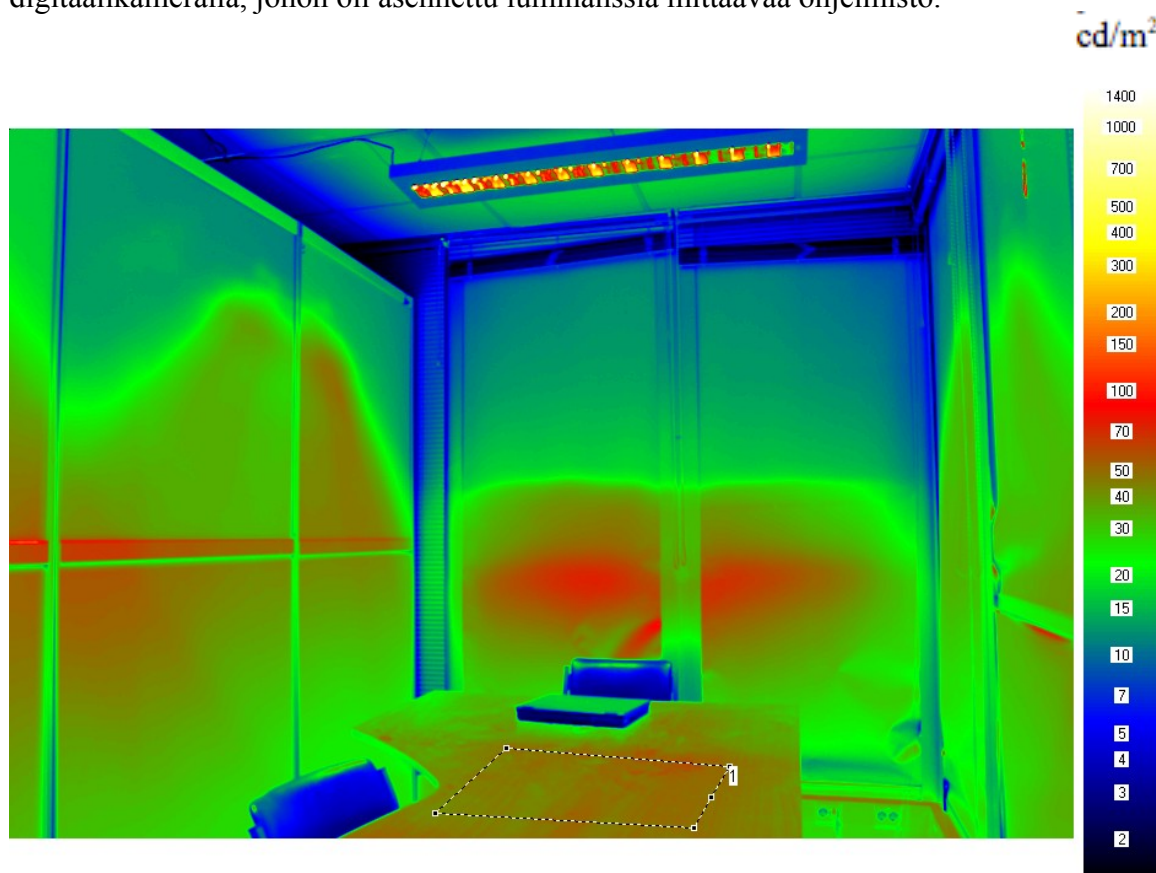
Jatkuvaa tilassa oleskelua varten haluttiin kuitenkin hieman enemmän valoa, joten himmennystasoa laskettiin arvoon 37,5%, jolloin työalueen valaistusvoimakkuus kasvoi välille 400-600 lx, ollen keskimäärin n. 500 lx. Tämä on esitetty kuvassa 6.23.



Kuva 6.23 Valaistusvoimakkuus työalueella, himmennys 37,5%

Kuvasta 6.23 nähdään, että nyt ollaan hyvin lähellä työpisteen valaistussuosituksia, joten valaistuksen voidaan todeta olevan riittävän hyvä, ainakin valaistusvoimakkuuden puolesta. Työalueen ulkopuoliselle alueelle kohdistui n. 350 luksia. Tässä tilanteessa valaisinten kuluttama sähköteho oli 38,7 wattia, joten valaistuksen kuluttama sähköteho/neliö oli n. 5 W/m<sup>2</sup>. Tätä voidaan pitää melko hyvänä tuloksena, kun huomioidaan, että yleensä toimistovalaisituksen tehontarpeeksi määritetään perinteisellä valaistuksella n. 12-15 W/m<sup>2</sup>.

Valon väri oli silmämääräisesti melko neutraali ja miellyttävä, mutta seinille muodostui ehkä hieman liian selkeät varjokohdat siinä, missä suora valo loppui, kuten nähdään alueelta otetussa luminanssikuvassa 6.24. Kuva on otettu Canon EOS 350-D digitaalikameralla, johon oli asennettu luminanssia mittaavaa ohjelmisto.



Kuva 6.24 Valokuution sisätilan luminanssijakauma himmennystasolla 37,5%

Valaistusjakaumaa olisi voitu parantaa lisäämällä tilaan myös epäsuoraa valoa, esimerkiksi asentamalla ledejä myös valaisimen yläpinnalle. Tämä olisi kuitenkin vaatinut optiikan lisäämisen valaisimen yläpinnalle, ja toisaalta ideana oli tuoda valoa vain työalueelle, jotta saavutettaisiin mahdollisimman tehokas valaistusratkaisu.

Asennuksen tarkoituksena oli osoittaa, että hyvään valaistuksen määrään on mahdollista päästä ledeillä huomattavasti pienemmällä teholla kuin mitä perinteisillä valaisimilla.

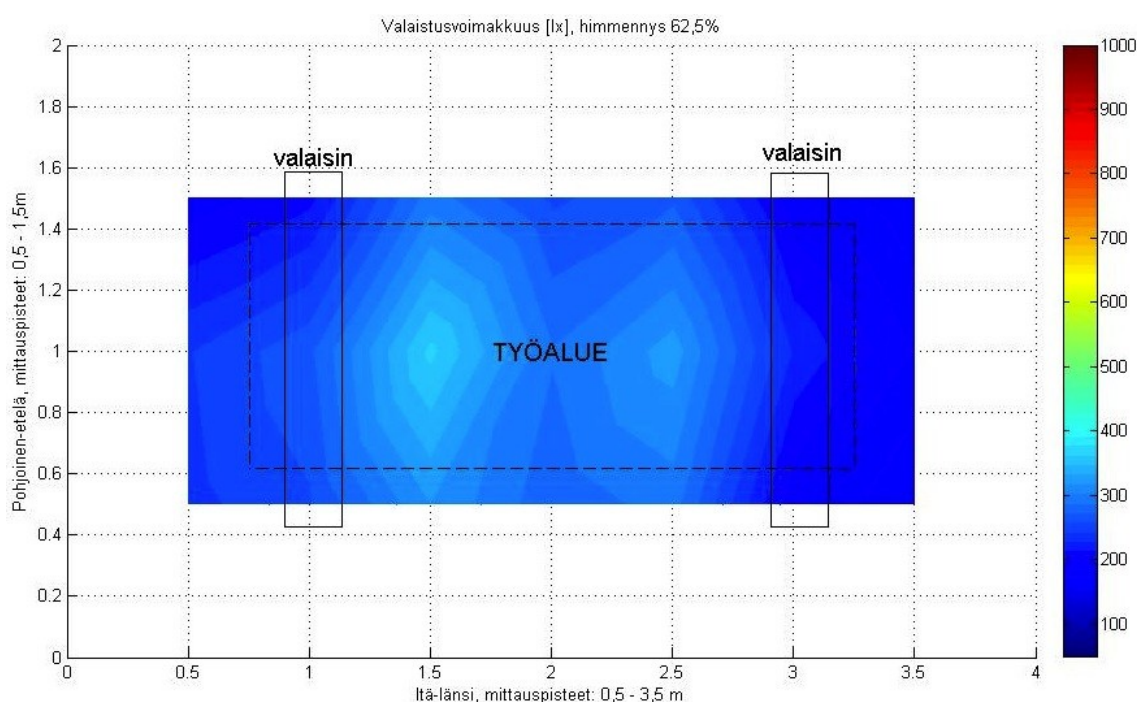
Tähän päästiinkin, sillä ennen muutoksia sähkötehoa kului valaisimissa n. 56 W (vain alaspäin osoittavat 28 W loistelamput huomioituna) ja muutostöiden jälkeen n 39 W.

Valon tasaisuus oli riittävän hyvä työalueella, mutta vielä parempaan tulokseen päästäisiin, kun valaisimiin asennettaisiin useampia pienitehoisempia ledejä, mikäli halutaan pitää valaisinten kokonaissähköteho yhtä suurena. Myös nyt käytettyjä 3 W ledejä voitaisiin lisätä, jolloin valon tasaisuus paranisi, mutta tällöin pitäisi himmennyksen avulla vähentää valaisimen kokonaistehoa.

Mielenkiinnon vuoksi kokeiltiin vielä lopuksi paljonko valaisimista tulee valoa, jos himmennystasoa nostetaan entisestään. Kun himmennysaste oli 62,5% täyteen valaistukseen verrattuna, sähköä kului alle kolmasosa alkuperäisestä ja keskimääräinen valaistusvoimakkuus työalueella oli n. 250 lx. Alhaisen valaistustason mittaukset on



esitetty kuvassa 6.25.



Kuva 6.25 Valaistusvoimakkuus työalueella, himmennysaste 62,5%

Mittausten perusteella laskettiin valotehokkuudet eri himmennysvaihtoehdoille. Taulukossa 6.2 olevat arvot lx/W on laskettu työalueen keskilinjalta mitattujen valaistusvoimakkuuksien keskiarvona. Valaistusvoimakkuudet vaihtelevat luonnollisesti tilan eri kohdissa, mutta vastaavista mittauspisteistä eri voimakkuuksilla mitattuja tuloksia vertailemalla saatiin käsitys siitä, miten himmennys vaikuttaa valaisinten valotehokkuuteen. Näiden perusteella laskettiin oikeanpuoleisin sarake, jossa on vertailtu eri himmennystasojen valotehokkuuksia suhteessa himmentämättömään valaistukseen.

Taulukko 6.2 Himmennysasteen vaikutus valotehokkuuteen

Himmennysaste %	valaisinten sähköteho [W]	Valotehokkuus, työalueen keskilinja, keskiarvo [lx/W]	Tehokkuus [himmennysaste / täysi teho]
62,5	21,78	13,54	1,2
50	29,04	14,05	1,25
37,5	38,72	13,18	1,17
0	72,6	11,27	1

Taulukosta 6.2 nähdään että demonstraatiossa käytetyt valaisimet toimivat tehokkaimmin, kun niitä on himmennetty n. 50 %.

### 6.3.3 Valontuotannon luotettavuustekijöitä

Ledit soveltuvat sinänsä hyvin off-grid tyyppisiin kohteisiin, sillä niiden huoltoväli on pitkä verrattuna useimpiin muihin valonlähteisiin. Tämän takia niiden käyttö onkin yleistä esimerkiksi hätävalaistuksessa. Ledien rikkoutumisen sijaan tässä projektissa suurin valontuotannon luotettavuutta vähentävä tekijä oli auringonpaisteen epäsäännöllisyys, ja vuodenajasta johtuva luonnonvalon vähyys mittauspaiikassa.

Valitulla valaistustasolla ja sen perusteella määritetyllä himmennysasteella valaisimet kuluttavat n. 40 W, eli järjestelmään liitetystä 210 Ah/ 24 V akustosta riittää tällöin varasähköä n. 120 tunniksi eli 5 vuorokaudeksi, jos valaistus on jatkuvasti päällä. Työpäivän mittaiseksi valitulla käyttösyklillä (8h/d) sähköä riittää siis ilman lisälatausta teoriassa pariksi viikoksi.

Käyttöaikaa laskee kuitenkin järjestelmän sisäänrakennettu ylipurkaussuoja, joka kytkee akuston irti kulutuksesta kun akuston varausaste laskee alle 30% täydestä varauksesta. Tämä huomioon ottaen mittauksessa käytetty järjestelmä toimii siis n. 11 vuorokautta ilman lisälatausta, mikä on todennäköisesti liian vähän talven pimeinä aikoina siihen että järjestelmä voisi olla täysin itsenäinen. Tämä tuli todettua myös käytännössä, sillä jotta valaistus saatiin pidettyä päällä 8h/5pv/vko, järjestelmän akkuja jouduttiin lataamaan n. 2 viikon välein pimeimpään aikaan mittauksista, jolloin valoisia päiviä oli hyvin vähän.

Käytännössä aurinkosähköjärjestelmän käyttö Suomessa ympärivuotisesti on mahdotonta ilman, että järjestelmään tuodaan sähköä myös jostain muusta voimanlähteestä. Periaatteessa luotettavuutta voitaisiin lisätä kasvattamalla akuston kokoa, sillä esimerkiksi tässä demonstraatioissa rakennetun järjestelmän sähköntuotannon huipputeho oli 300 W, eli n. 8 kertainen valaistuksen vaatimaan tehoon nähden, jolloin huipputuotannon aikana sähköä saadaan siis monin verroin varastoon verrattuna kulutukseen. Suurikapasiteettinen akusto nostaa kuitenkin huomattavasti järjestelmän hintaa ja akuston sijoittaminen saattaa myös tuottaa ongelmia. Mikäli aurinkosähköä käytetään esimerkiksi kesämökillä, voi sähkön saatavuuden varmistamiseksi parempi vaihtoehto olla esimerkiksi tuulivoima, kuin akuston koon kasvattaminen hyvin suureksi.

Mikäli asennuskohteessa on myös yleinen sähköverkko, yleensä halvimmaksi tulee ostaa sähköä valtakunnan sähköverkosta silloin kun oma tuotanto ei riitä.

## 6.4 Pohdintaa demonstraation tuloksista

Tässä kappaleessa pyritään selvittämään miten hyvin toteutettu ratkaisu onnistui, miten kalliiksi se tuli suhteessa saavutettuun hyötyyn ja toisaalta pyritään myös löytämään ratkaisuja ilmenneisiin ongelmiin.

### 6.4.1 Kustannukset

Omavaraisen aurinkosähköjärjestelmän, eli niin sanotun *off-grid*-järjestelmän kustannukset muodostuvat käytännössä täysin laitteiston hankintakustannuksista. Energia itsessään on ilmaista, olettaen että aurinkosähköntuotantoa ei tarvitse täydentää muilla tuotantomuodoilla. Hankintakustannusten lisäksi asennustavasta riippuen voi tulla lisäksi huoltokustannuksia, mikäli esimerkiksi halutaan vaihtaa manuaalisesti paneelien kallistuskulmaa, tai johonkin järjestelmän komponenttiin tulee toimintahäiriö. Kiinteästi asennetussa aurinkosähköjärjestelmässä ei kuitenkaan ole liikkuvia osia, joten ilman toimintahäiriöitä se on hyvin pitkälti huoltovapaa.

Aurinkosähköjärjestelmät ovat toistaiseksi kallis vaihtoehto sähköntuotantoon sellaisilla alueilla jotka kuuluvat yleisen sähköverkon piiriin. Kaukana sähköverkon ulottumattomissa oleviin kohteisiin, kuten saaristomökkeihin, ne ovat kuitenkin usein kannattava ratkaisu.

Syöttötariffit ja aurinkosähköjärjestelmien massatuotannon myötä halventuvat tuotantokustannukset voivat kuitenkin tulevaisuudessa tehdä aurinkosähköjärjestelmistä houkuttelevamman vaihtoehdon myös taajama-alueille. Ratkaisevaa tässä on verkosta ostetun sähkön hintakehitys, syöttötariffien suuruus ja se miten paljon massatuotanto laskee aurinkosähköjärjestelmien hintoja.

Jo nykyisellään aurinkosähköllä on sähköntuotannon lisäksi myös sen hyvästä imagosta johtuvaa lisäarvoa: yritykset ja yksityiset kansalaiset voivat aurinkosähköä asentamalla pyrkiä osoittamaan, että ovat kiinnostuneita uusiutuvasta energiasta ja ilmastonmuutoksen torjunnasta. Tästä voi etenkin yritysten tapauksessa olla välillistä hyötyä, esimerkiksi yrityksen parantuneesta imagosta johtuen saavutettuja uusia asiakassuhteita. Näiden tuoman rahallisen merkityksen arviointi on kuitenkin hankalaa.

Tämän tutkimuksen yhteydessä toteutetun aurinkosähköjärjestelmän kokonaishinnaksi tuli 3890 euroa, joka tosin sisälsi myös 5 kappaletta mittauspaneeleita, jotka eivät sisältyneet varsinaiseen aurinkosähköjärjestelmään.

Jos aurinkosähköjärjestelmän käyttöajaksi ajatellaan 8 tuntia päivässä, 5 päivänä viikossa, valaistuksen kuluttamaksi sähkönmääräksi tulisi valitulla himmennystasolla vuodessa n. 87,5 kWh.

Solpros Oy:n tekemän Tekes-projektin selvityksen mukaan Suomen olosuhteissa nykyisillä aurinkopaneeleilla voidaan tuottaa n. 1kWh /  $W_p$  (Solpros, 2001) vuodessa. Tällöin siis käytössä olleella 300  $W_p$ -aurinkosähköjärjestelmällä voitaisiin tuottaa n. 300 kWh vuodessa, joten sähköä jäisi valaistuksen lisäksi myös muuhun käyttöön, tai valaistuksen käyttötunteja voitaisiin nostaa.

Vuonna 2009 sähkön keskimääräinen hinta (energiahinta + siirtohint) oli n. 12,5 snt/kWh (Energiamarkkinavirasto, 2009), joten demonstraatioissa käytetyn valaistuksen kuluttaman energian hinnaksi olisi tullut verkosta ostettuna vuodessa n. 11 euroa.

Mikäli järjestelmää olisi käytetty ympäri vuorokauden, 7 päivää viikossa, olisi vuodessa kulutetun energian hinnaksi tullut n. 46 euroa, nykyisillä sähkön keskimääräisillä hinnoilla. Tällöin tosin energiaa kuluisi n. 368 kWh, joten käytössä olleen aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti ei riittäisi edes teoriassa koko kulutuksen kattamiseen, puhumattakaan talviajan pienen tuotannon aiheuttamista kausittaisista ongelmista. Joka tapauksessa kulutetun sähkön hinta ostettuna sähkömarkkinoilta jää todella pieneksi verrattuna aurinkosähköjärjestelmän hankintakustannuksiin.

Koska kyseessä oli kuitenkin off-grid-järjestelmä, ei sille lähdetty määrittämään tässä yhteydessä varsinaista takaisinmaksuaikaa, sillä vaihtoehtoista sähköä ei ajateltu olevan saatavilla, eikä sähkön tulevaa hintakehitystä lähdetty arvioimaan.

Yhteenvedona voidaan todeta, että toistaiseksi aurinkosähköjärjestelmien asennus ei yleisen sähköverkon alueelle ole nykyisellään kannattavaa, suhteellisen halvan verkkosähkön hinnan ja aurinkosähköjärjestelmien kalliiden asennuskustannusten takia. Sähkön tulevaisuuden hintakehitystä on kuitenkin hankala arvioida ja toisaalta myös uusilla tekniikoilla aurinkopaneelien hyötysuhdetta saadaan todennäköisesti parannettua, samalla kun niiden hinta laskee nykyisestä massatuotannon myötä. Toistaiseksi aurinkosähkön laajamittainen rakentaminen on perusteltua Suomen olosuhteissa vain mikäli valtio alkaa tukea sitä hyvin vahvasti esimerkiksi syöttötariffien muodossa, ja lisäksi sellaisissa kohteissa, mihin ei sähkölinjoja voida vetää järkevillä kustannuksilla.

#### **6.4.2 Tehokkuus**

Aurinkopaneelien tuotannon kannalta tehokkuusmittaukset toteutettiin oikeastaan huonoimpaan mahdolliseen aikaan maantieteelliseen sijaintiin nähden, eli lokatammikuussa. Tämä rajoitti osaltaan saatuja tuottoja, mutta toisaalta osoitti konkreettisesti, mitä ongelmia aurinkopaneeleilla toteutetussa sähköntuotannossa on näillä leveysasteilla.

Kesällä säteilyä tulee aurinkoa kohti kallistetulle pinnalle yli 6-kertainen määrä verrattuna talven pimeimpään aikaan. (tarkemmat tiedot, kts. liite 3).

Oman ongelmansa muodostavat paneelin pinnalle kertyvät lumi- ja jääkuormat.

Esimerkki tästä on kuvassa 6.26, jossa näkyy tammikuun 2010 alkuun mennessä kertyneen lumen määrä suurin piirtein samassa kallistuskulmassa olevalle pinnalle, kuin mitä tässä tutkimuksessa käytetyissä aurinkopaneeleissa käytettiin. Aurinkopaneelien pinnalle ei päässyt kertymään näin paljon lunta missään vaiheessa, sillä ne puhdistettiin lumesta lähes päivittäin.



Kuva 6.26 Lumen määrä kallistetulla pinnalla mittauspäikällä

Kuvasta 6.26 nähdään että n.  $45^\circ$  asteen kulmassa olevalle pinnalle on kertynyt suunnilleen kymmenen senttiä lunta, vaakasuorilla pinnoilla samalla katolla lumen paksuus oli tällöin n. 20-30 cm. Pystysuorassa oleville mittauspäineille ei lunta kertynyt luonnollisestikaan näin paljoa, mutta myös näiden pinnalle kertyi jäistä haurasta valoa läpäisemätön kerros noin viikon aikana, kun ulkolämpötila vaihteli välillä  $-10$ - $15^\circ\text{C}$ .

Jään ja lumen kertymiseen vaikuttaa kallistuskulma, ympäristön lämpötila, ilman kosteus sekä lumisateiden määrä. Jäätymistä voidaan vähentää valitsemalla pystysuorempi kallistus talviaikaan, mikä on muutenkin auringon säteilyn tulosuunnan huomioon ottaen perusteltua. Jäätymistä voitaisiin vähentää myös päneeleihin asennettavilla lämmittimillä, mutta tämän energiatehokkuudellinen kannattavuus on vähintäänkin kyseenalaista, koska päneelien tuottama sähkön määrä jää muutenkin pieneksi talvella.

Vähäisestä säteilymäärästä johtuen myös päneelien tehokkuutta kuvaava hyötysuhde jäi melko alhaiseksi, ollen parhaimmillaan noin 10 %. Talvella aurinkopäneelit soveltuvat siis myös suhteessa heikommin sähköntuotantoon, säteilymäärän vähäisyydestä johtuvan alhaisen tuotannon lisäksi.

Valaistuksen osalta sen sijaan päästiin melko hyvään tehokkuuteen.  $5\text{ W/m}^2$  toimistovalauksessa on suhteellisen hyvä tulos, tosin valon jakautumisessa huoneessa oli vielä parantamisen varaa. Led-valaistuksen idea on kuitenkin kohdistaa valoa nimenomaan sinne missä sitä tarvitaan, mikä on mahdollista pienikokoisten suuntaavien valonlähteiden takia, joten asennusta voidaan pitää melko hyvin onnistuneena, etenkin kun valaisimia ei oltu alun perin edes rakennettu ledien kanssa käytettäväksi. Vasta vasten ledejä ajatellen rakennetuilla valaisimilla päästäisiin hyvin todennäköisesti tässä käytettyjä valaisimia tasaisempaan valonjakoon.

Tasajännitteisyyden tuomia etuja tässä yhteydessä oli lähinnä se, että valaistuksen yhteyteen ei tarvittu muuntajia. Hyötysuhteen vertailu vaihtojännitteellä toteutettuun järjestelmään jäi avoimeksi, sillä se olisi käytännössä edellyttänyt muilta osin identtisen järjestelmän rakentamista, jossa olisi käytetty vaihtojännitettä.

## 7 Yhteenveto

Toistaiseksi aurinkosähköjärjestelmät ovat vielä melko kalliita ja niiden hyötysuhde on kohtalaisen alhainen. Tulevaisuudessa molempiin näistä odotetaan parannusta. Osaltaan asennettujen aurinkosähköjärjestelmien määrää tulee nostamaan maailmanlaajuinen kiinnostus uusiutuviin energianlähteisiin ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen.

Ledeihin pätee pitkälti samat seikat kuin aurinkopaneeleihin, eli perinteisesti ne ovat olleet kallis valonlähde, suhteessa niistä saatavan valon määrään. Kehitys ledien valontuotossa on kuitenkin ollut viime vuosina todella nopeata, ja niiden leviäminen yleisvalaistuksen merkittäväksi valonlähteeksi onkin toteutumassa näillä näkymin jo lähitulevaisuudessa. Massatuotannon myötä myös ledien hinnat tippuvat jatkuvasti.

Tasajännitteellä tapahtuvassa sähkönsiirrossa tapahtuu vähemmän häviöitä kuin vaihtojännitesiirrossa, joten se soveltuu erityisen hyvin pitkille siirtoetäisyyksille korvaamaan nykyisiä vaihtojännitteellä toteutettuja siirtolinjoja.

Monet nykyisistä sähkölaitteista toimivat sisäisesti tasajännitteellä, joten tasajännitejakelulla voitaisiin vähentää myös AC/DC-muuntajien määrää nykyisestä. Tämä mahdollistaisi nykyistä pienemmät muuntohäviöt. Tämä seikka tukee tasajänniteverkkojen rakentamista myös kiinteistöihin.

Valaistus olisi melko helppo rakentaa hyödyntämään tasajännitettä, sillä tällöin voitaisiin käyttää kiinteätä jännitetasoa, eikä jännitemuunnoksia tarvittaisi. Jos verkkoon haluttaisiin liittää myös muita sähkölaitteita, jotka toimivat eri jännitetasoilla, pitäisi sen yhteyteen liittää myös DC/DC-katkoja tai invertterejä jännitemuunnoksia varten.

Niin kauan kuin kuluttajille suunnatut sähkölaitteet on pääasiassa suunniteltu vaihtojänniteverkossa toimiviksi, ei tasajänniteverkkojen yleistyminen kiinteistöissä ole kuitenkaan todennäköistä.

Aurinkoenergian käytön lisääntyminen on vahvasti sidoksissa valtioiden uusiutuviin energianlähteisiin kohdistamiin tukitoimiin, eritoten syöttötariffeihin. Saksassa tariffit on asetettu aurinkoenergian osalta niin korkeiksi, että on jopa alettu epäilemään, että tämä tukee tehotonta energiantuotannon rakentamista, sen pohjana olevan teknologian parantamisen sijaan. Tukitoimien kohdistaminen oikeisiin kohteisiin onkin yksi tulevaisuuden energiapolitiikan tärkeistä kysymyksistä.

Toistaiseksi Suomeen on asennettu melko vähän aurinkosähköjärjestelmiä ja kaikki tämän hetken suurimmat aurinkosähköjärjestelmät tuottavat sähköä vain tuottajan omaan käyttöön. Verkkoon sähköä syöttäviä aurinkosähkölaitoksia ei ole vielä toistaiseksi rakennettu Suomeen, mutta myös niitä on suunnitteilla tulevaisuudessa.

Aurinkosähkön lisääntyminen Suomessa riippuu voimakkaasti tukitoimista ja eritoten siitä missä vaiheessa ja minkä suuruisena syöttötariffit otetaan käyttöön maassamme aurinkosähkölle, jolloin myös aurinkosähkön syöttämisestä yleiseen sähköverkkoon tulee kannattavampaa.

Tämän työn yhteydessä toteutetussa demonstraatiossa päästiin melko hyviin tuloksiin valaistuksen energiatehokkuuden osalta, vaikkakin led-valaisinten valonjaossa oli pieniä puutteita.

Kokonaisuudessaan ei kuitenkaan tullut ilmi seikkoja, jotka estäisivät led-valaistuksen käytön toimistoissa. Eräs vaihtoehto tähän on tasajännitteisyys, mutta se toisaalta edellyttää erillisen kaapeloinnin vetämistä normaalin vaihtojännitekaapeloinnin lisäksi

toimistoon, ainakin niin kauan kuin muut toimiston sähkölaitteet on suunniteltu toimimaan vaihtojännitteellä.

Aurinkopaneelien mittauksia haittasi mittausten ajankohta. Talvisin Suomen leveysasteilla auringon säteily on heikkoa, mikä näkyi myös mittaustuloksissa. Mittausten perusteella aurinkoisina päivinä säteilyä tulee myös talviaikaan hetkellisesti melko runsaasti, etenkin 90° kallistetuille pinnoille, mutta valoisian ajan lyhyiden ja aurinkoisien päivien vähäisyyden takia tuotetun sähkön kokonaismäärä jää pieneksi talvella.

Osaltaan demonstraatiossa kävi ilmi, että aurinkopaneelien hyötysuhde riippuu säteilyn määrästä. Pienemmällä säteilymäärällä myös hyötysuhde jäi alemmaksi, kun taas säteilyn lisääntyessä myös hyötysuhde parani. Lämpötilan vaikutus mittaustuloksiin ei ollut merkittävä, koska lähes koko mittausajan ulkona oli pakkasta, jolloin aurinkopaneelien lämpeneminen ei heikentänyt niiden tehokkuutta.

Toteutetun demonstraation tärkein lopputulos oli, että aurinkosähköllä voidaan tuottaa toimistovalaisuus suoraan tasajännitteellä, mutta aurinkopaneelien lisäksi tarvitaan myös muuta energiantuotantoa sen yhteyteen, jotta järjestelmästä saataisiin järkevän kokoinen ja hintainen ympärivuotiseen käyttöön.

Yksinomaan kesäkäyttöön suunniteltuna aurinkosähköjärjestelmä voi riittää jo sellaisenaan, kunhan se mitoitetaan riittävän isoksi kulutusta ajatellen, sekä aurinkopaneelien että energian varastointiin käytettävien akkujen osalta.

## Kirjallisuus

1. All About Circuits  
P-N junction. Viittausajankohta 16.09.2009  
[http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_3/chpt\\_2/6.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_2/6.html)
2. Citizen, 2009  
LED Specifications. Viittausajankohta 13.10.2009  
[http://ce.citizen.co.jp/lighting\\_led/pdf/en/spec/CL-L102/CL-L102-C3N-B\\_P404\\_0309\\_R1\(0309\)\\_E.pdf](http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/pdf/en/spec/CL-L102/CL-L102-C3N-B_P404_0309_R1(0309)_E.pdf)
3. Cheng, C.L. & Sanchez Jimenez, Charles S. & Meng-Chieh Lee, 2009  
Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans  
Renewable Energy 34, s. 1644-1650
4. Desertec foundation, 2009  
Clean power from deserts, viittausajankohta 3.2.2010  
Whitebook, 4th Edition  
[http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/DESERTEC-WhiteBook\\_en\\_small.pdf](http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/DESERTEC-WhiteBook_en_small.pdf)
5. Duffie, John A. & Beckman, William A., 2006  
Solar engineering of thermal processes, 3rd edition.  
John Wiley & Sons, Inc, New Jersey US, 908s. ISBN-13 978-0-471-69867-8
6. Fraunhofer ISE  
Press release: World Record: 41.1% efficiency reached for multi-junction solar cells at Fraunhofer ISE. Viittausajankohta 6.10.2009  
<http://www.ise.fraunhofer.de/press-and-media/pdfs-zu-presseinfos-englisch/2009/press-release-world-record-41.1-efficiency-reached-for-multi-junction-solar-cells-at-fraunhofer-ise-pdf-file>
7. Energiamarkkinavirasto, 2009  
Sähkön hintavertailulaskuri, viittausajankohta 26.02.2010  
<http://www.sahkonhinta.fi/summariesandgraphs>
8. Europes Energy portal, 2010  
Photovoltaics installed 2008, viittausajankohta 12.02.2010  
<http://www.energy.eu/#renewable>
9. Hebe Corporation, 2008  
Multicrystalline solar panels. Viittausajankohta 04.03. 2010  
<http://www.hebesolar.com/upfiles/80Wp%20multicrystalline%20solar%20panelmain.jpg>
10. Institute of Science in Society (ISIS)  
Quantum Dots and Ultra-Efficient Solar Cells, viittausajankohta 21.1.2010  
<http://www.i-sis.org.uk/QDAUESC.php>
11. Institute of Science in Society (ISIS), 2006



Organic Solar Power, viittausajankohta 21.1.2010

<http://www.i-sis.org.uk/OSP.php>

12. Kylkisalo, Toni & Alanen, Raili, 2007

Tasajännite taajaman sähköjakelussa ja mikroverkoissa

VTT Working papers 78

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2007/W78.pdf>

VTT, ISBN 978-951-38-6629-7

13. Karlsson, Per & Svensson, Jörgen

Fault Detection and Clearance in DC Distributed Power Systems

NORPIE2002 Conference Proceedings

<http://www.iea.lth.se/~ielper/DistributedPowerSystems/NORPIE2002-paper.pdf>

14. Kiilto Oy, 2008

Kiilto ryhtyi ilmaston parannustoimiin ja investoi Suomen suurimpaan aurinkovoimalaan, yhtiön tiedote. Viittausajankohta 12.2.2010

<http://www.kiilto.com/fi/uutiset/tiedotteet/?id=583>

15. Lund, Peter, 2009

Aurinkoenergian tulevaisuus Suomessa, viittausajankohta 3.2.2010

[http://www.aurinkoteknillinenyhdistys.fi/liite/ATY30v\\_040309\\_lund.pdf](http://www.aurinkoteknillinenyhdistys.fi/liite/ATY30v_040309_lund.pdf)

16. Mörsky, J. 1994

Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka

Otatieto, Helsinki, 300 s. ISBN 951-672-184-2

17. Naps Systems, 2008

Naps Systems, referenssit, viittausajankohta 15.02.2010

<http://www.napssystems.fi/referenssit.html>

18. NASA, 2009

Spectral Distribution Curves related to Solar Optical radiation.

Viittausajankohta 03.03.2010

<http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section05.htm>

19. NASA Surface Meteorology database, 2009

Tietokanta auringon säteilyn määrittämiseksi eri parametreillä, viittausajankohta 12.1.2010

<http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&step=1&submit=Submit>

20. National laboratory of the U.S. Department of Energy (NREL), 2009

Concentrating Solar Power, viittausajankohta 04.03.2010

[http://www.nrel.gov/learning/re\\_csp.html](http://www.nrel.gov/learning/re_csp.html)

21. OLED info, 2009

OLED technology explained, viittausajankohta 19.1.2010

<http://www.oled-info.com/oled-technology>

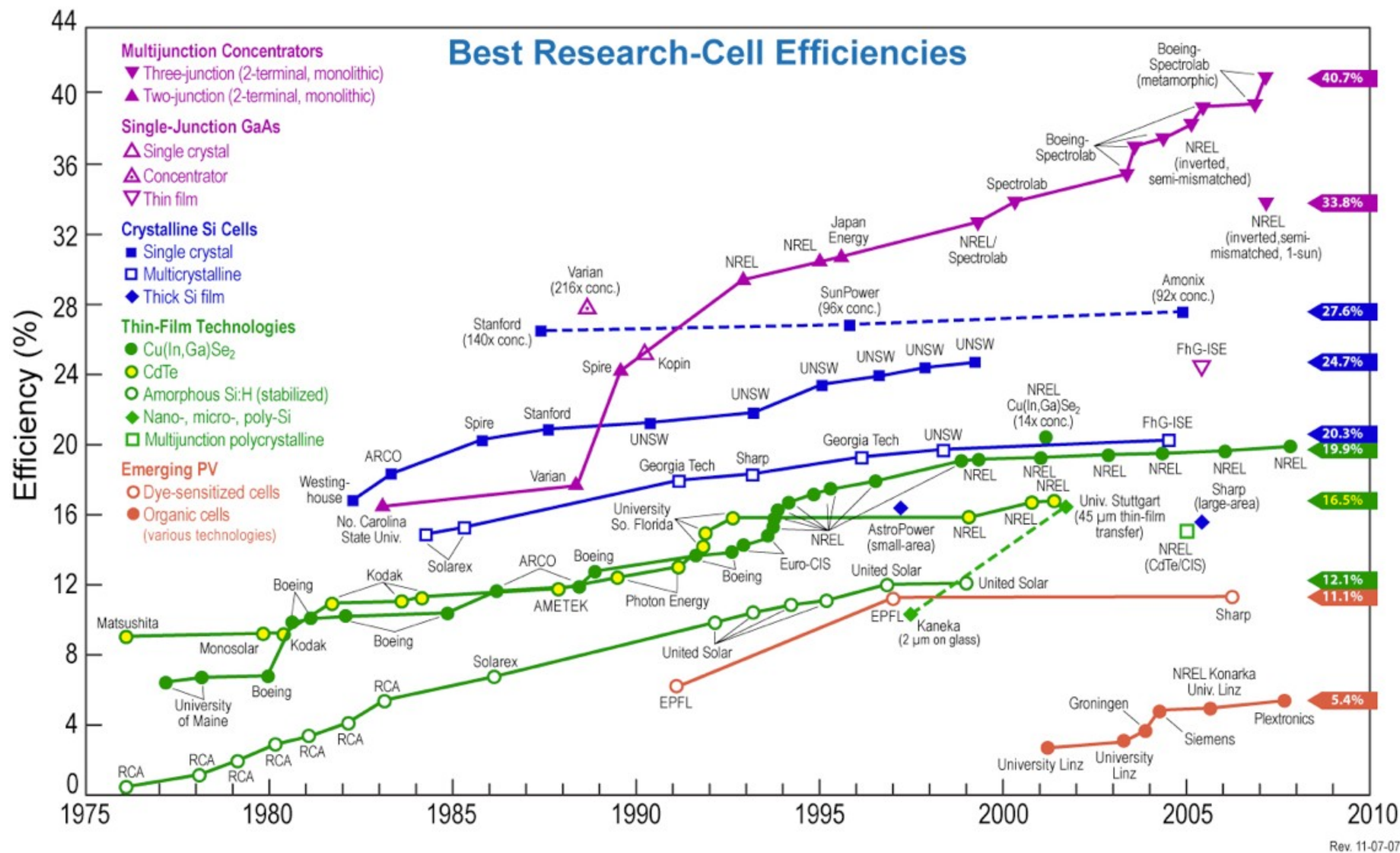
22. Paavola, Martti. 1975.  
Sähköjohdot.  
WSOY, Porvoo, 320 s. ISBN 951-0-06635-4
23. Pirilä, 2009  
Syöttötariffit Saksassa ja Syomessa, viittausajankohta 15.02.2010  
<http://pirila.fi/energia/2009/11/24/syottotariffit-saksassa-ja-suomessa/>
24. PVNord, 2005  
Brief Building Report – NCC Head office, viittausajankohta 1.2.2010  
EU-rahoitteisen PV-nord hankkeen tuloksia.  
[http://www.pvnord.org/buildings/ncc\\_finland\\_head\\_office/Brief\\_Building\\_report\\_NCC\\_Head\\_office.pdf](http://www.pvnord.org/buildings/ncc_finland_head_office/Brief_Building_report_NCC_Head_office.pdf)
25. PVNord, 2004  
Brief Building Report - Ekoviikki, viittausajankohta 1.2.2010  
EU-rahoitteisen PV-nord hankkeen tuloksia.  
[http://www.pvnord.org/buildings/ekoviikki/Brief\\_Building\\_Report\\_Ekoviikki\\_Salvia.pdf](http://www.pvnord.org/buildings/ekoviikki/Brief_Building_Report_Ekoviikki_Salvia.pdf)
26. PV resources, 2009  
[Large-scale photovoltaic power plants ranking 1 - 50](http://www.pvresources.com/en/top50pv.php), viittausajankohta 15.02.2010  
<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>
27. REN21, 2009  
Renewable global status update 2009, viittausajankohta 4.2.2010  
[http://www.ren21.net/pdf/RE\\_GSR\\_2009\\_Update.pdf](http://www.ren21.net/pdf/RE_GSR_2009_Update.pdf)
28. Kimmo Silvonen, 2009  
Elektroniikka ja puolijohdekomponentit  
Hakapaino, Helsinki 2009, 501s. ISBN 978-951-672-361-0
29. Salonen, Pasi, 2006  
Tasasähkön hyödyntämismahdollisuudet sähkönjakelussa, diplomityö  
Lappeenrannan teknillinen yliopisto
30. E. Fred Schubert, 2008  
Light-Emitting Diodes, second edition.  
Cambridge University Press, Cambridge UK, 422s. ISBN 978-0521-86538-8
31. Sisäpiiri, 2001  
TKK/S Alumni lehti, 1-2/2001, s-12-15, viittausajankohta 12.02.2010  
[http://electronics.tkk.fi/fi/tiedekunta/alumnit/1-2\\_2001.pdf](http://electronics.tkk.fi/fi/tiedekunta/alumnit/1-2_2001.pdf)
32. SMA, 2009  
Inverter Guide, viittausajankohta 26.1.2010.  
Aurinkosähkö-invetterien datalehtiä  
<http://www.solarelectricsupply.com/pdf/Sunny%20Boy/sma-products.pdf>

33. Solar Energy Development Programmatic EIS  
Concentrating Solar Power Technologies  
<http://solareis.anl.gov/guide/solar/csp/index.cfm>
34. Solpros, 2005  
Aurinkoenergian käyttö Suomessa vuonna 2001, viittausajankohta 26.02.2010  
[http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/3rdeport\\_final.PDFLiite](http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/3rdeport_final.PDFLiite)
35. Spiegel, 2009  
Germany Turns On World's Biggest Solar Power Project, viittausajankohta 12.02.2010  
<http://www.spiegel.de/international/germany/0,1518,643961,00.html>
36. Steca, 2009 (1)  
StecaGrid 300 and StecaGrid 500 - MiniString inverter for grid feeding,  
viittausajankohta 12.2.2010  
[http://www.steca.com/index.php?StecaGrid\\_300\\_500\\_Control\\_en](http://www.steca.com/index.php?StecaGrid_300_500_Control_en)
37. Steca, 2009 (2)  
Steca PR, viittausajankohta 12.2.2010  
[http://www.steca.com/index.php?Steca\\_PR\\_10\\_30\\_en](http://www.steca.com/index.php?Steca_PR_10_30_en)
38. Top-Alternative-Energy-Sources.com  
Silicon Solar Cells Or Wafer-Based Cells, 2008, viittausajankohta 20.1.2010  
<http://www.top-alternative-energy-sources.com/silicon-solar-cells.html>
39. Top-Alternative-Energy-Sources.com  
Thin Film Solar Cells, viittausajankohta 20.1.2010  
<http://www.top-alternative-energy-sources.com/thin-film-solar-cells.html>
40. US National Science Foundation, 2009  
Solar panel output calculator, viittausajankohta 21.12.2009  
<http://pvcddrom.pveducation.org/SUNLIGHT/MODTILT.HTM>
41. Voltaic, 2009  
Voltaic Solar Bags and Solar Chargers, viittausajankohta 3.2.2010  
<http://eu.voltaicsystems.com/>

## Ledien värikartta

	Wavelength (nm)	Color Name	Fwd Voltage (Vf @ 20ma)	Intensity 5mm LEDs	Viewing Angle	LED Dye Material
	940	Infrared	1.5	16mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Arsenide
	880	Infrared	1.7	18mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Arsenide
	850	Infrared	1.7	26mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Aluminum Arsenide
	660	Ultra Red	1.8	2000mcd @50mA	15°	GaAlAs/GaAs -- Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Aluminum Arsenide
	635	High Eff. Red	2.0	200mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	633	Super Red	2.2	3500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	620	Super Orange	2.2	4500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	612	Super Orange	2.2	6500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	605	Orange	2.1	160mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	595	Super Yellow	2.2	5500mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	592	Super Pure Yellow	2.1	7000mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	585	Yellow	2.1	100mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	4500K	"Incandescent" White	3.6	2000mcd @20mA	20°	SiC/GaN -- Silicon Carbide/Gallium Nitride
	6500K	Pale White	3.6	4000mcd @20mA	20°	SiC/GaN -- Silicon Carbide/Gallium Nitride
	8000K	Cool White	3.6	6000mcd @20mA	20°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	574	Super Lime Yellow	2.4	1000mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	570	Super Lime Green	2.0	1000mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	565	High Efficiency Green	2.1	200mcd @20mA	15°	GaP/GaP - Gallium Phosphide/Gallium Phosphide
	560	Super Pure Green	2.1	350mcd @20mA	15°	InGaAIP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	555	Pure Green	2.1	80mcd @20mA	15°	GaP/GaP - Gallium Phosphide/ Gallium Phosphide
	525	Aqua Green	3.5	10,000mcd @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	505	Blue Green	3.5	2000mcd @20mA	45°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	470	Super Blue	3.6	3000mcd @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride
	430	Ultra Blue	3.8	100mcd @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide / Gallium Nitride

## Aurinkopaneeleilla saavutettuja hyötysuhteita laboratorio-olosuhteissa



### Liite 3. Auringon säteilyn tilastoja

#### Aurinkopaneelin kulman muutos suhteessa sen tehon muutokseen (NASA Surface meteorology and Solar Energy database)

Asennuspaikka:  
60° N, 25° E (Helsinki)

**Monthly Averaged Radiation Incident On An Equator-Pointed Tilted Surface (kWh/m<sup>2</sup>/day)**

Lat 60 Lon 25	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
SSE HRZ	0.34	1.10	2.46	3.99	5.35	5.57	5.33	4.08	2.59	1.19	0.50	0.20	2.73
K	0.36	0.46	0.51	0.51	0.52	0.48	0.49	0.47	0.44	0.38	0.39	0.34	0.45
Diffuse	0.24	0.68	1.35	1.97	2.49	2.77	2.62	2.21	1.43	0.75	0.34	0.14	1.42
Direct	0.80	1.94	3.34	4.62	5.77	5.51	5.37	4.02	3.09	1.73	1.08	0.56	3.16
Tilt 0	0.32	1.10	2.44	3.96	5.41	5.63	5.40	4.09	2.54	1.18	0.50	0.20	2.74
Tilt 45	0.76	2.00	3.50	4.67	5.42	5.26	5.19	4.39	3.31	1.87	1.11	0.55	3.18
Tilt 60	0.83	2.12	3.53	4.47	4.98	4.75	4.71	4.11	3.26	1.93	1.21	0.61	3.05
Tilt 75	0.86	2.12	3.37	4.05	4.39	4.14	4.13	3.69	3.06	1.89	1.24	0.64	2.80
Tilt 90	0.83	2.00	3.05	3.48	3.63	3.37	3.39	3.12	2.71	1.76	1.20	0.63	2.43
OPT	0.86	2.13	3.54	4.69	5.69	5.74	5.55	4.49	3.32	1.93	1.24	0.64	3.32
OPT ANG	76.0	67.0	55.0	39.0	24.0	14.0	16.0	30.0	48.0	62.0	74.0	79.0	48.5



## Liite 4. Kuluttajille myytävien aurinkopaneelien hintoja v. 2009

Ilmoitettu teho [Wp]	Paneelin tyyppi	teknologia	hinta [€]	€ / W	valmistaja	kauppa
135	KD 135	monikide	629	4.66	Kyocera	Thermosun.fi
135	KD 135	monikide	629	4.66	Kyocera	JN-Solar.fi
180	YL - 180	monikide	850	4.72	Yinglin	Thermosun.fi
180	YL - 180	monikide	895	4.97	Yinglin	Suntekno.fi
50	FVG 50 P	monikide	249	4.98	FVG Energy	JN-Solar.fi
80	FVG 80M	yksikide	399	4.99	FVG Energy	JN-Solar.fi
80	FVG36-125-80M	yksikide	410	5.13	FVG Energy	Thermosun.fi
95	SPR-90	yksikide	495	5.21	Sunpower	Suntekno.fi
95	SPR-90	yksikide	495	5.21	Sunpower	Thermosun.fi
80	FVG 80	yksikide	435	5.44	FVG Energy	Solarpoint.fi
90	TFF 90 S	ohutkalvo+monikide	495	5.50	?	Suntekno.fi
90	TFF 90 S	ohutkalvo+monikide	495	5.50	?	Thermosun.fi
90	TFF 90 S	ohutkalvo+monikide	495	5.50	?	Solarpoint.fi
50	SunSet PX 50	yksikide	285	5.70	SunSet	Thermosun.fi
120	GPV-120	monikide	695	5.79	GPV	Solarpoint.fi
85	GPV-85	yksikide	495	5.82		Suntekno.fi
85	GPV-85	yksikide	495	5.82	GPV	Thermosun.fi
85	GPV-85	yksikide	495	5.82	GPV	Solarpoint.fi
130	SPR-130	yksikide	760	5.85	Sunpower	Thermosun.fi
50	SPR-50	yksikide	295	5.90	Sunpower	Suntekno.fi
50	SPR-50	yksikide	295	5.90	Sunpower	Thermosun.fi
55	SM-55	monikide	325	5.91	Solara	Suntekno.fi
55	SM-55	monikide	325	5.91	Solara	Thermosun.fi
130	SPR-130	yksikide	795	6.12	Sunpower	Suntekno.fi
40	SPR-40	yksikide	245	6.13	Sunpower	Suntekno.fi
40	SPR-40	yksikide	245	6.13	Sunpower	Thermosun.fi
65	KC 65	monikide	399	6.14	Kyocera	JN-Solar.fi
95	KD 95 SX	monikide	599	6.31	Kyocera	JN-Solar.fi
125	SM-125	monikide	790	6.32	Solara	Thermosun.fi
125	SM-125	monikide	795	6.36	Solara	Suntekno.fi
75	SM-75	monikide	495	6.60	Solara	Solarpoint.fi
120	SM-120	monikide	795	6.63	Solara	Solarpoint.fi
85	SM-85	monikide	590	6.94	Solara	Thermosun.fi
85	SM-85	monikide	595	7.00	Solara	Suntekno.fi
85	SM-85	monikide	595	7.00	Solara	Solarpoint.fi
55	SM-55	monikide	395	7.18	Solara	Solarpoint.fi
20	SPR-20	yksikide	145	7.25	Sunpower	Suntekno.fi
20	SPR-20	yksikide	145	7.25	Sunpower	Thermosun.fi
130	NP130GK	monikide	950	7.31	NAPS	Solarpower.fi
64	NP 64 GK	monikide	560	8.75	NAPS	Air-fish.com
130	NP 130 GK	monikide	1250	9.62	NAPS	Air-fish.com
85	NP 85 GK	monikide	850	10.00	NAPS	Air-fish.com
33	NP 33 GK	monikide	359	10.88	NAPS	JN-Solar.fi
45	SunSet SM 45 Lite	yksikide	545	12.11	SunSet	Thermosun.fi
34	SM-34	monikide	429	12.62	Solara	Thermosun.fi
34	SM 34	monikide	430	12.65	Solara	Suntekno.fi
34	SM-34	monikide	430	12.65	Solara	Solarpoint.fi
30	SunSet SM 30 Lite	yksikide	435	14.50	SunSet	Thermosun.fi

## Kuluttajille myytävien aurinkosähköjärjestelmien hintoja, esimerkkejä

<b>Teho [Wp]</b>	<b>Paneelin / järjestelmän tyyppi</b>	<b>teknologia</b>	<b>hinta [€]</b>	<b>€ / W</b>	<b>valmistaja</b>	<b>kauppa</b>
510	Steca grid 500	järjestelmä, sisältää invertterit ja 6 x GPV-85	3590	7.04	Steca + GPV	Thermosun.fi
22	NP22RSS	monikide, venejärjestelmä joka sisältää myös lataussäätimen	475	21.59	NAPS	Solarpower.fi
33	NP33RSS	monikide, venejärjestelmä joka sisältää myös lataussäätimen	590	17.88	NAPS	Solarpower.fi
44	NP44RSS	monikide, venejärjestelmä joka sisältää myös lataussäätimen	690	15.68	NAPS	Solarpower.fi
85	Naps Standard 85	monikide. Järjestelmä sisältää myös NC-15 lataussäätimen, 115Ah akun, kaapelit ja telineet + asennustarvikkeita	1090	12.82	NAPS	Solarpower.fi



## Liite 5. Kuluttajille myytävien lataussäädinten ja invertterien hintoja v. 2009

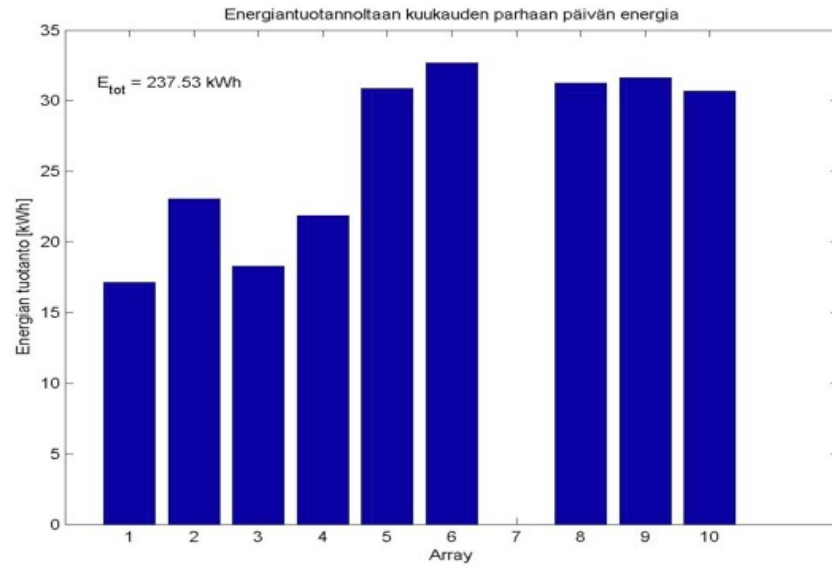
### Lataussäätimet

Ottojännite max [V]	Anto jännite [V]	maksimi latausvirta [A]	maksimiteho [W]	tyyppi	hintaa	valmistaja	kauppa
	12	10	120	FVG 10	69	FVG	JN-solar.fi
45	12	7	130	NAPS Maxpower	155	Naps Systems	Solarpower.fi
45	12	7	130	NAPS Maxpower	149	Naps Systems	Thermosun.fi
45	12	7	130	NAPS Maxpower	149	Naps Systems	JN-solar.fi
43	12 / 24	15	360	NAPS NC15	295	Naps Systems	Solarpower.fi
43	12 / 24	15	360	Naps NC15	280	Naps Systems	Kaamoscenter.fi
43	12 / 24	15	360	Naps NC15	280	Naps Systems	Air-fish.com
43	12 / 24	30	720	NAPS NC30	435	Naps Systems	Solarpower.fi
43	12 / 24	30	720	Naps NC30	430	Naps Systems	Kaamoscenter.fi
43	12 / 24	30	720	Naps NC30	430	Naps	Air-fish.com
25	12	5	80	Naps NC5	110	Naps Systems	Kaamoscenter.fi
25	12	5	80	Naps NC5	120	Naps Systems	Air-fish.com
150	12-60	60	ei ilmoitettu	OutBack FLEXmax 60	980	OutBack	Suntekno.fi
95	12 / 24	20	ei ilmoitettu	Phocos MPTT 100/20	269	Phocos	JN-solar.fi
ei ilmoitettu	12 / 24	8	135	Solara SR 135 TL	49	Solara	Suntekno.fi
ei ilmoitettu	12 / 24	8	135	Solara SR 135 TL	49	Solara	Thermosun.fi
47	12 / 24	8	ei ilmoitettu	Solsum 8.8	40	Steca	Suntekno.fi
47	12 / 24	8	100	Solsum 8.8	39	Steca	Thermosun.fi
47	12 / 24	10	240	Steca PR 1010	109	Steca	JN-solar.fi
47	12 / 24	20	480	Steca PR 2020	169	Steca	Suntekno.fi
47	12 / 24	20	480	Steca PR 2020	149	Steca	JN-solar.fi
47	12 / 24	30	720	Steca PR 3030	189	Steca	Suntekno.fi
47	12 / 24	30	720	Steca PR 3030	185	Steca	Thermosun.fi
47	12 / 24	30	720	Steca PR 3030	199	Steca	JN-solar.fi
47	12 / 24	12	150	Steca Solarix Gamma	59	Steca	Thermosun.fi

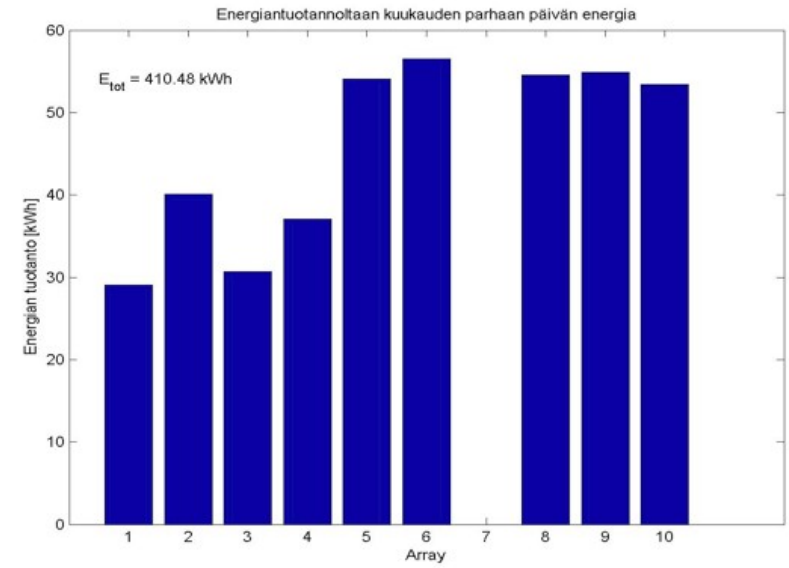
### Invertterit

Ottojännite max [V]	Antojännite	maksimiteho [W]	Maksimi sisääntulovirta [A]	tyyppi	hintaa [€]	hyötysuhde [%]	valmistaja	kauppa
135	230 V / 50 Hz	300	5	Steca Grid 300 T	277	93,4	Steca	Suntekno.fi
230	230 V / 50 Hz	500	5	Steca Grid 500 T	372	93,4	Steca	Suntekno.fi
135	230 V / 50 Hz	300	5	Steca Grid 300 T	275	93,4	Steca	Thermosun.fi
230	230 V / 50 Hz	500	5	Steca Grid 500 T	370	93,4	Steca	Thermosun.fi
450	230 V / 50 Hz	2000	16	Steca 2000 Master M	1349	92,4	Steca	Thermosun.fi
450	230 V / 50 Hz	2000	16	Steca 2000 Master M	1350	92,4	Steca	Suntekno.fi

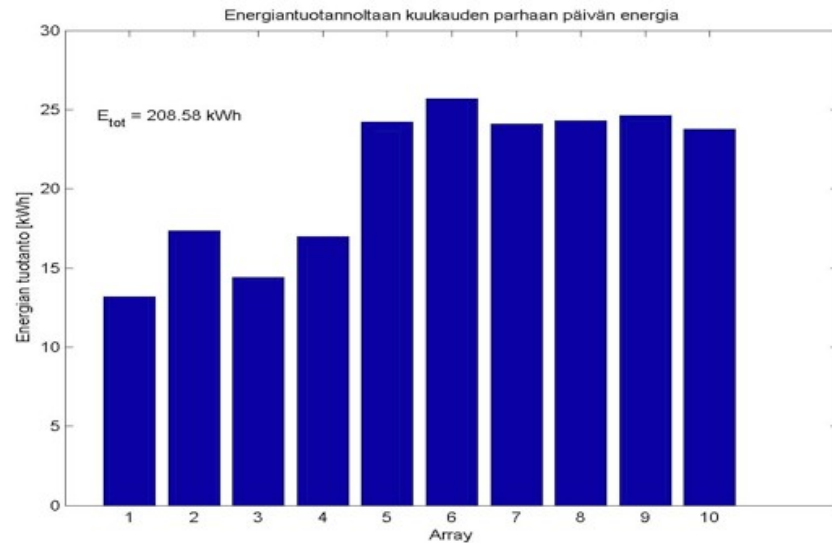
Esimerkki melko pilvisestä kesäpäivästä 2.6. 2009



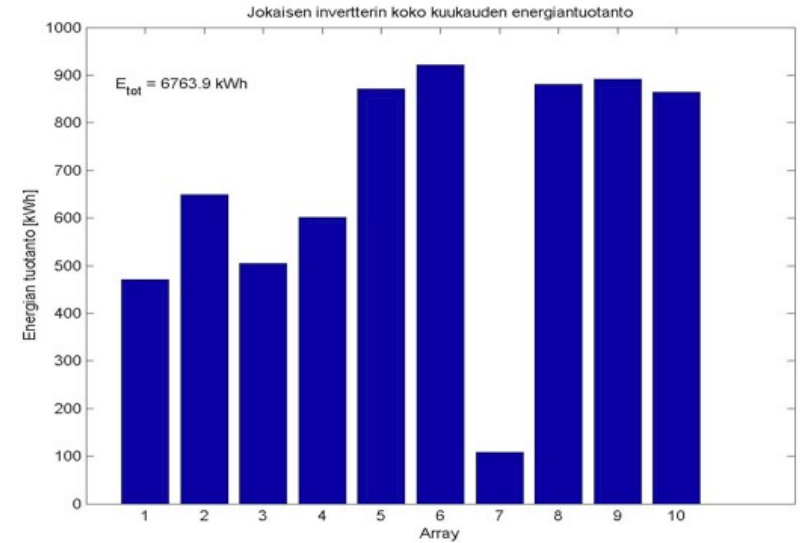
Esimerkki melko aurinkoisesta kesäpäivästä 7.6.2009



Esimerkki puolipilvisestä syyspäivästä 3.9.2009



Energiantuotanto toukokuun puolivälistä kesäkuun puoliväliin 2009



## **Liite 7. Mittausjärjestelyissä käytetty laitteisto**

### **1. Aurinkopaneelijärjestelmä**

#### Aurinkopaneelit

- Tyyppi: Naps NR100G24
- lkm: 3
- Käyttöjännite: 24 V
- Oikosulkuvirta: 3,2 A
- Avoimen piirin jännite: 42,2 V
- Maksimiulostulevirta: 3,0 A
- Maksimiulostulojännite: 33,3 V
- Tehontuotto / paneeli: 100 W (maksimi)
- Kokonaissähköteho: 300 W (maksimi)

#### Mittauspaneelit

- Tyyppi: Naps 13009
- lkm: 5
- Käyttöjännite: 3,5 V
- Tehontuotto / paneeli: 13 W

#### Akusto:

- lkm: 4
- Jännite: 6 V
- Akuston jännite ulospäin: 24 V (akut sarjassa)
- kennojen lkm / akku:
- Varauskapasiteetti / akku: 210 Ah
- Varauskapasiteetti yhteensä: 210 Ah (akut sarjassa)

#### Tarvikkeet:

- Lataussäädin: Naps NC-30N
- Kytkenärasia: Naps Abox
- Akkukaapeli: 25A automaattisulakkeella
- Paneelien kaapelointi:
- Asennustelineet paneeleille
- Akkulaturi varavoiman tuottoon: Einhell BT-BC 15

### **2. Valaistusjärjestelmä**

#### Valaisin

- Perustuu vanhaan loisteputkivalaisimeen, asennettiin putkien tilalle ledejä.
- Valaisin: Idman (Philips) Triola (28 W loisteputkilla)
- LEDien tyyppi: Citizen CL-L102-C3N-B
- Luvattu valontuotto: 70 lm/W
- LEDien lkm / valaisin: 11
- LED-driverit: Innoline RCD-24-0.35
- LED-driverien lkm / valaisin: 6
- Käyttöjännite: 18-30 V
- Sähkönkulutus liitäntälaitteineen / valaisin: 37 W täydellä teholla
- Himmennysvaihtoehdot:

Himmennysjännite V	teho / max teho [%]
12	0
9	25
7,5	37,5
6	50
4,5	62,5
3	75
0	100

- Väriämpötila: 4000 K
- Valaistusteho: 2900 lm

- Valaisinten lkm: 2
- Sähkönkulutus yhteensä maksimiteholla: 74W

### 3. Mittalaitteet

- Daqbook 112
- DBK19 lämpötilan mittauskortti
- akuston lämpötila-anturi
- termoparilankaa, tyyppi K ulkolämpötilan mittaukseen
- 5x 470 mΩ vastus mittauspaneelien jännite-alueen muutokseen
- 4 x 120 kΩ vastus akuston jännitteen mittaukseen
- Dell kannettava tietokone mittautulosten käsittelyyn ja tallennukseen
- DaisyLab V 9.00.02 mittausohjelmisto
- LMT Pocket Lux 2